

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

Б.П.БУСЫГИН

ЭЛЕКТРОМОБИЛИ

(Методы расчета)

Учебное пособие

Утверждено в качестве учебного пособия
советом факультета Г С У

МОСКВА 1979

7-80-47428

В учебном пособии даны общие сведения об электромобильном транспорте, рассмотрены вопросы, связанные с электрическими установками, электрическими тяговыми двигателями, системами и механизмами управления, трансмиссиями, ходовой частью, кузовами и дополнительным оборудованием. Большое внимание уделено вопросам эксплуатации электромобилей.

Предназначено оно для студентов факультета автомобильного транспорта специальности I609 "Автомобили и автомобильное хозяйство" специализации "Специализированный подвижной состав".

Пособие соответствует программе курса "Проектирование автомобилей".

I. РАСЧЕТ ОДНОТИПНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

I. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Коэффициент сопротивления качению φ для скорости до 30 км/ч можно принять для городских дорог $\varphi = 0,015$, для проселочных дорог $\varphi = 0,025$. Тогда расход энергии на преодоление сопротивления качению будет (на горизонтальном участке) для асфальта 0,0408 кВт.ч, для пробелка 0,0681 кВт.ч на I т.км полного веса электромобиля.

Сопротивление воздуха
 $P_{\text{в}} = K \cdot F \cdot U_{\text{a}}^2$,

где U_{a} - скорость электромобиля, м/с;

F - площадь проекции лобовой части электромобиля на вертикальную плоскость;

K - коэффициент, зависящий от очертания кузова.

В табл. I приводятся сопротивление воздуха и расход энергии на его преодоление для типовых электромобилей.

Таблица I

| Грузоподъемность, т | Масса электромобиля, т | Скорость, ускорение | | | | |
|------------------------|---------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 10 км/ч | 15 км/ч | 20 км/ч | 25 км/ч | 30 км/ч |
| | | 2,72 | 4,16 | 5,56 | 6,94 | 8,34 |
| | | м/с | м/с | м/с | м/с | м/с |

Сопротивление воздуха

| | | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|------|-------|------|
| 0,5-1,0 | - | 0,19 | 1,47 | 3,29 | 5,89 | 9,16 | 13,4 |
| 2,0-3,0 | - | 0,23 | 1,78 | 3,98 | 7,12 | 11,05 | 16,0 |
| 5 | - | 0,30 | 2,32 | 5,20 | 9,28 | 14,42 | 27,9 |

Расход энергии на преодоление сопротивления воздуха, кВт.ч на I т.км полного веса

| | | | | | | | |
|---------|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,5-1,0 | 3 | 0,19 | 0,0013 | 0,0050 | 0,0053 | 0,0083 | 0,0120 |
| 2,0-3,0 | 7 | 0,23 | 0,0007 | 0,0015 | 0,0028 | 0,0043 | 0,0062 |
| 5 | II | 0,30 | 0,0006 | 0,0013 | 0,0023 | 0,0036 | 0,0052 |

ПРИМЕЧАНИЕ. Произведение $K \cdot F$ взято по опытным данным.

Расход энергии на преодоление сопротивления воздуха (в кВт.ч на I т.км полной массы электромобиля) вычисляется по выражению

$$\frac{P_B \cdot 1000}{G \cdot I} \text{ кгм/т.км} = \frac{P_B \cdot 1000}{75 \cdot I \cdot 36 \cdot 3600} \text{ кВт.ч/т.км,}$$

где G - полная масса электромобиля.

(Полная масса - масса с грузом)

Как видно из табл.2, сопротивление воздуха до 30 км/ч весьма мало, и им можно пренебречь в расчете.

Сопротивление подъема

$$P_n = G \cdot \sin \alpha = G \cdot i,$$

где $i = \sin \alpha$;

α - угол подъема;

G - полная масса электромобиля.

Для подсчета расхода энергии на преодоление полного сопротивления движению нужно суммировать расходы энергии на преодоление сопротивления качению, сопротивления воздуха и сопротивления от подъема.

В табл.3 подсчитан расход энергии для преодоления полного сопротивления движению при различных подъемах для двух типов дорог - асфальтированной и проселочной. По табл.3 вычисляются средний расход энергии при движении по заданному маршруту с известным профилем пути.

В большинстве случаев работа электромобиля не связана с определением маршрута и профили пути заранее не известны. Кроме того, необходимо еще учесть добавочный расход энергии на разгон электромобиля при трогании с места.

Таким образом, средний фактический расход энергии в условиях городского движения будет зависеть не только от профиля пути и качества дороги, но и от частоты остановок и условий движения.

Из опытов известно, что расход энергии в городском движении увеличивается по сравнению с расходом на горизонтальном участке (при средних скоростях 12-20 км/ч) в среднем на 40-50%. Принимая расход энергии при движении на горизонтальном участке при скорости 20 км/ч равным 0,0461 кВт ч на 1 т.км (табл.3), получим средний расход энергии в условиях городского движения: 0,0461 x 0,0645 кВт.ч/т.км (на ободе колес).

Принимая КПД трансмиссии равным 0,85 и КПД электродвигателя 0,88, получаем, что от батареи требуется

$$\frac{0,0645}{0,85 \times 0,88} = 0,086 \text{ кВт.ч на 1 т.км полной массой.}$$

Таблица 2

| | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Полезная энергия, % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 15 | 12 |
| Расход энергии на 1 т.км полной массы, кВт/ч | 0,010 | 0,020 | 0,030 | 0,040 | 0,050 | 0,060 | 0,080 | 0,100 | 0,12 | 0,15 |
| Сопротивление полной массы, кг/т | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 |
| Расход энергии на 1 т.км полной массы, кВт/ч | 0,0367 | 0,7734 | 0,1102 | 0,1468 | 0,1836 | 0,2200 | 0,2940 | 0,3500 | 0,9400 | 0,5490 |

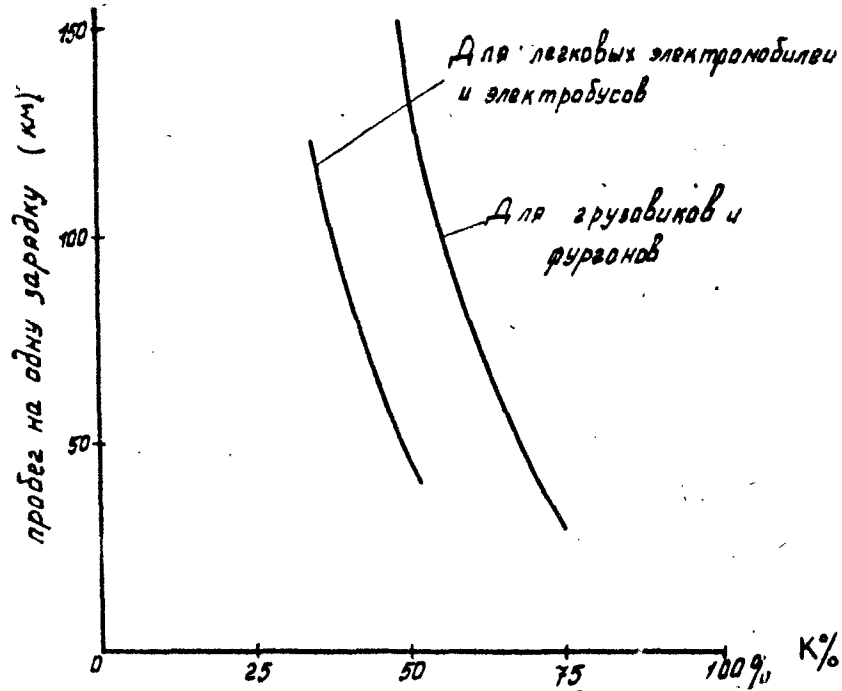


Рис. 1

Из предыдущего уравнения следует

$$\frac{X}{G} = \frac{q \cdot e}{300 \cdot L}$$

т.е. отношение масс батарей к полной массе машины является линейной функцией величины пробега.

Принимая средний фактический расход энергии 0,075 кВт.ч/т.км. можно получить величину пробега.

Построим график пробега для соответствующей нормальной эксплуатации, для чего нанесем прямые $\frac{X}{G}(L)$ совместно с кривыми

для коэффициента K (рис.2).

$$K = \frac{\text{полезный груз} + \text{масса батарей}}{\text{полная масса}}$$

Точки пересечения прямых $\frac{X}{G}(L)$ с кривой K даст максимальную величину пробега реального электромобиля в том случае, когда весь перевозимый груз будет состоять из аккумуляторов.

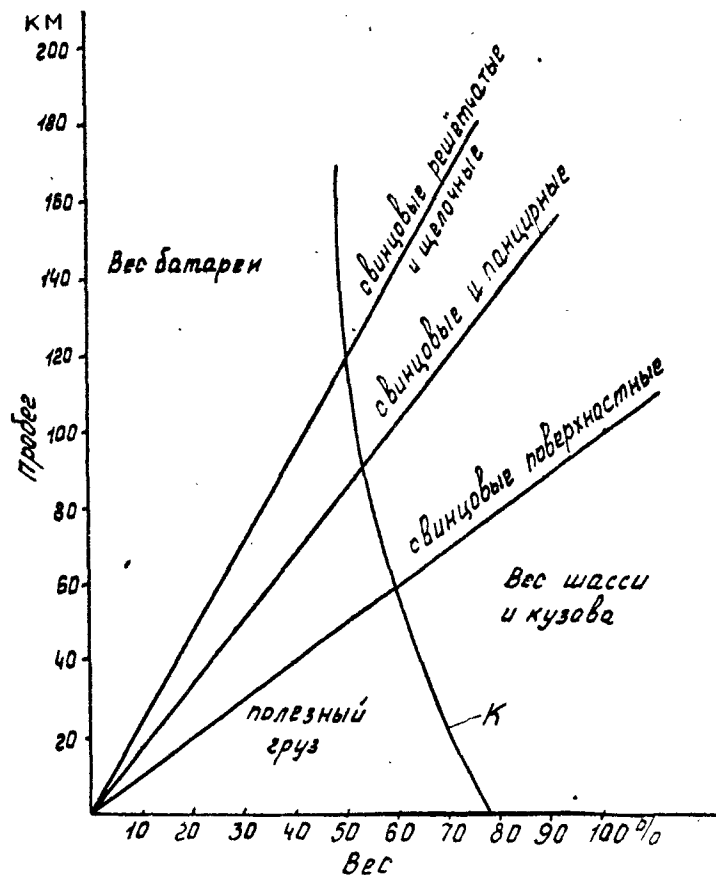


Рис.2

По графику в зависимости от заданной величины пробега легко найти процент соотношения масс полезного груза, батареи и шасси с кузовом, так как слева от прямой $\frac{X}{G}(L)$ лежит масса

батарей. Между этой прямой и кривой К лежит полезная масса, и справа от кривой К лежит масса шасси и кузова.

График позволяет отделить средние, техникоэкономические и экономически целесообразные пробеги электромобилей вообще, так как кривая К, отсекая массу шасси и кузова, определена статистически.

В отдельных конструкциях путем облегчения конструкции шасси можно достигнуть лучших результатов.

При подборе батарей к конструктивно выполненному электромобилю, вес шасси которого известен, кривая К превратится в вертикальную прямую.

Для случаев частичной подзарядки и смены батарей построим графики пробега и стоимости (рис.3). Графики пробега приведены

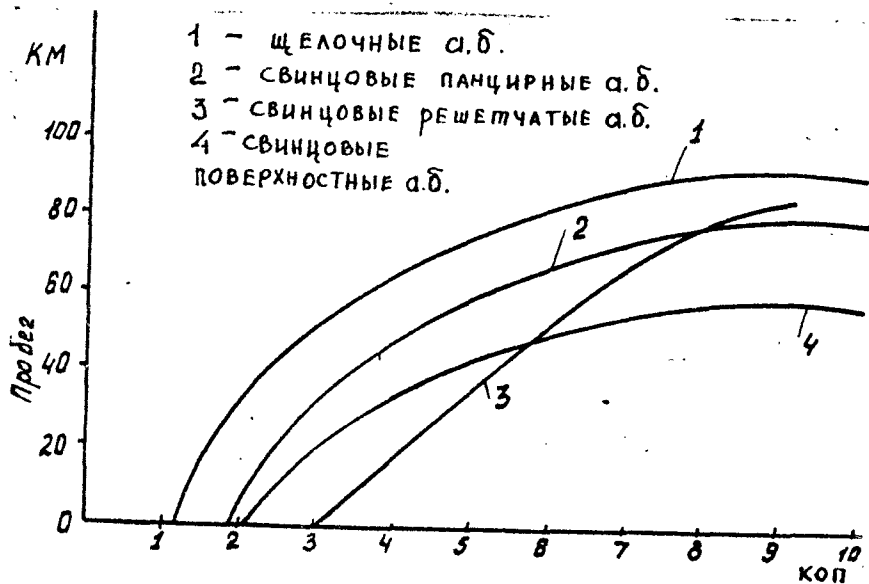


Рис.3

выше. Графики стоимости представляют собой зависимость пробега от полной стоимости энергии или возобновления батарей на полезный тонно-километр.

Строится график стоимости при расходе энергии 0,075 кВт.ч/т.км и при стоимости энергии 4 коп. за 1 кВт.ч для некоторых типов аккумуляторных батарей. Известно, что цены стоимости в пределы рентабельности тех или иных аккумуляторов имеют лишь иллюстративный

характер, так как они при изменении цены и срока службы аккумуляторов будут значительно меняться.

Анализируя графики пробега и стоимости, можно отметить следующее:

1. Подзарядку и смену а.б. можно производить для того, чтобы увеличить дневной пробег при сохранении прежней стоимости энергии и батарей на полезный тонно-километр и уменьшить стоимость энергии и батарей на полезный тонно-километр при сохранении прежней величины дневного пробега.

2. Чрезмерное увеличение батарей уменьшает грузоподъемность электромобиля и увеличивает стоимость перевозки полного тонно-километра. Наоборот, чрезмерное уменьшение батарей (следовательно, и пробега) сравнительно немного снижает стоимость перевозки полезного тонно-километра. При этом батарея подвергается усиленному разряду, так как прежняя сила тока (определяемая условиями дороги и движения) дается теперь батареями меньшей емкости. Отсюда следует, что чрезмерное снижение массы батарей также нецелесообразно.

3. В случае применения частичной подзарядки или смены батарей для удешевления стоимости полезного тонно-километра при неизменном пробеге следует учитывать, что батарея будет разряжаться более интенсивно, и следует проверить, способна ли батарея без вреда переносить этот усиленный разрядный режим. В случае смены батарей нужно считаться с тем, что зарядка сменяемых батарей потребует дополнительных расходов на персонал зарядной станции.

Рассмотренный нами метод имеет также недостатки:

1. Метод не учитывает влияния увеличения скорости электромобиля на сокращение величины пробега на одну зарядку. А пробег должен сокращаться за счет увеличения расхода энергии на т.км при повышении скорости (влияние сопротивления воздуха) и уменьшения емкости батарей при увеличении быстроты разряда (силы разрядного тока).

2. При определении расхода энергии такие факторы, как частота остановок, задержки и разгоны в условиях городского движения, качество и профиль пути учитывались эмпирически.

3. В методе не уделено внимания изменению КПД трансмиссии и электродвигателя на разных скоростях.

4. Метод дает весьма значительный запас, так как при оценке возможных пробега путем статистического определения коэффициента К облегченные конструкции электромобилей отбрасывались.

Выбор напряжения батарей

Выбор напряжения батарей, т.е. числа ее элементов, определяется следующими соображениями:

- батарея должна допускать заряд от сети постоянного тока, от умформерных групп, составленных из нормальных электрических машин или выпрямительных устройств серийного производства;
- сила тока в главной цепи электрооборудования не должна быть чрезмерно велика.

Первое требование вызвано тем, чтобы для зарядки батарей электрооборудования не требовались электрические машины и аппараты специального изготовления. Стандартные, применяемые для зарядки напряжения постоянного тока - 110, 220 В. Так как в конце зарядки батарей требуется 2,6-2,7 В на элемент для свинцовых и до 1,75-1,8 В на элемент для щелочных аккумуляторов, то для данного случая число элементов батарей должно быть при напряжении сети 110 или 220 В. Число элементов для свинцовой а.б. соответственно равно 40-42 или 80; для щелочных - 60 или 120 и т.д. Иначе полный заряд батарей будет невозможен.

Второе требование вызвано тем, что большая сила тока усложняет конструкцию и увеличивает вес и стоимость коммутационной аппаратуры и проводки.

Поэтому с увеличением грузоподъемности электрооборудования, а следовательно, и мощности электродвигателя приходится применять более высокое напряжение, т.е. большее число элементов батарей.

Примеры выбора напряжения

| Грузоподъемность : электрооборудования, т : | Число элементов : батарей | Напряжение, В |
|--|---------------------------------|------------------|
| До 2,0-2,5 | 40 свинцовых или 60 щелочных | 80 |
| Выше 3-3,5 | 80 свинцовых 120 щелочных | 160 |

ПРИМЕЧАНИЕ. Номинальное напряжение на элемент 2 В для свинцовых и 1,25 В для щелочных аккумуляторов.

В данном случае номинальное напряжение, на которое должен быть рассчитан электродвигатель - 80 или 160 В.

Иногда для очень малых электрооборудований и электротележек приме-

няются батареи в 20 элементов (номинальное напряжение 40 В). Заряд таких батарей производится обычно по две последовательно от сети 110 В и т.д.

Выбор мощности электродвигателя к однотипной энергетической установке

Мощность, необходимая для движения электрооборудования с заданной скоростью, определяется выражением

$$N = \frac{W \cdot v}{\eta \cdot 0,736}, \text{ д.с. на } 1 \text{ т полного веса,}$$

- где W - полный расход энергии на преодоление сопротивления движению, кВт.ч/т.км;
 v - скорость электрооборудования, км/ч;
 η - КПД трансмиссии.

По этой формуле строится график зависимости мощности от подъема при различных скоростях (рис. 4).

Понятие номинальной мощности электродвигателя отличается от понятия номинальной мощности ДВС.

Номинальной мощностью автомобильного ДВС называют мощность, соответствующую высшей точке его характеристики, т.е. максимальную мощность, которую вообще может развить данный двигатель (рис.5).

Поэтому автомобильный ДВС подбирается по максимальной мощности, требующейся для заданных условий движения.

На рис.6 показаны характеристики электродвигателя последовательного возбуждения. Из них видно, что максимальная мощность и максимальный момент, который может развить электродвигатель, далеко выходят за пределы его номинального рабочего режима.

Различают :

- продолжительную мощность;
- кратковременную (30-минутную, часовую, двухчасовую и т.п.);
- мощность, предельную при коротких перегрузках (на несколько минут, секунд); ограничивается коммутацией и механической прочностью.

Тяговые электродвигатели выбирают по предельному моменту и нагреву. Нагрев пропорционален средней квадратичной силе тока

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T}},$$

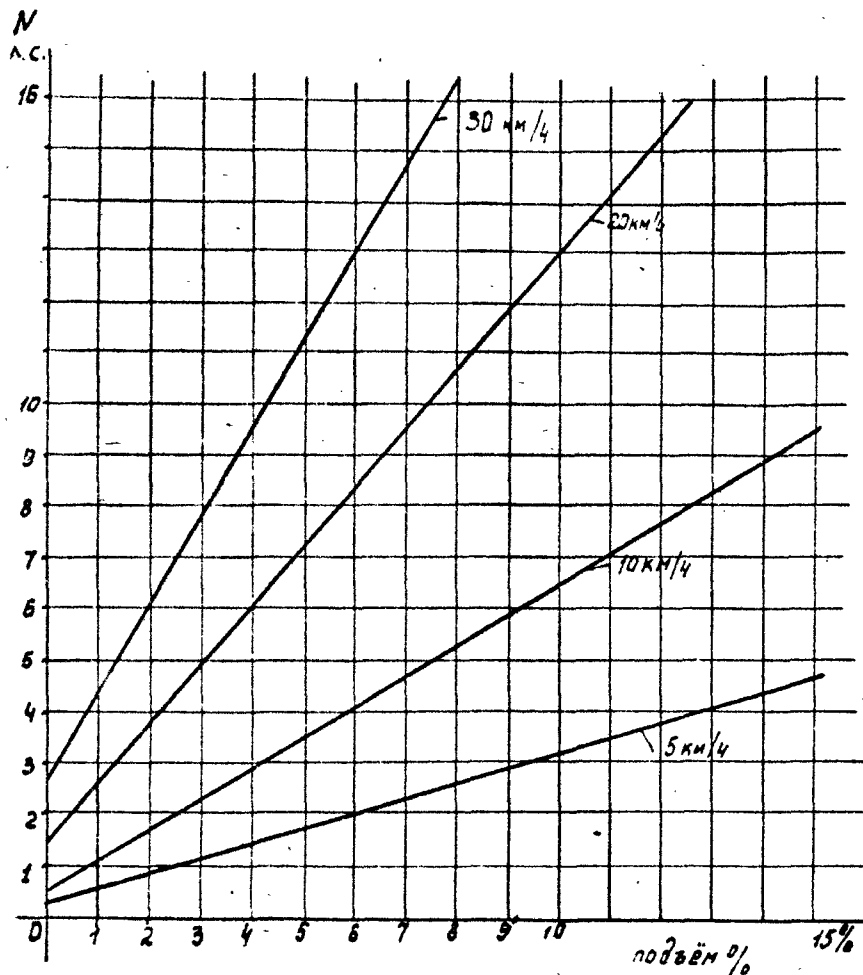


Рис. 4

или при $U = const$ средняя квадратичная мощность

$$P_{эф} = \sqrt{\frac{\int_0^T P^2 dt}{T}}$$

Чтобы исключить опасность перегрева электродвигателя, необходимо его мощность, выбранную по среднеарифметической нагрузке, увеличить, помножив ее на коэффициент ε , представляющий собой отношение среднего квадратичного тока к среднему арифметическому.

Методика выбора электродвигателя для электрообойла

1. По кривым рис.4 определяем мощность, необходимую для равномерного движения по горизонтальному участку с заданной средней скоростью (эту мощность можно считать средней арифметической). Обозначим ее N_a .

2. Найдем величину длительной мощности электрообойла:

$$N_{\varepsilon} = N_a \cdot \varepsilon$$

(Коэффициент ε для городской езды можно принять равным 1,1). Кривые рис.4 построены с учетом КПД трансмиссии.

Такой выбор хорошо согласуется с практикой и применением для большинства городов с умеренно холмистым рельефом.

3. Максимальная скорость электрообойла определяется часовой мощностью подобранного электродвигателя.

4. Максимальный преодолеваемый подъем (короткий) определяется мощностью электродвигателя, развиваемой им при 3-4-кратной перегрузке (по силе тока).

Построение тяговой и динамической характеристик

Построение тяговой характеристики электрообойла производится таким же методом, как и для обычного автомобиля. Зная механическую характеристику электродвигателя $M(n)$, передаточное число трансмиссии и диаметр колес электрообойла, пересчитывают частоту вращения электродвигателя n на скорость движения V км/ч. По моменту электродвигателя M определяют тяговое усилие P_m .

Вычитая из последнего потери на трансмиссию, получают тяговое усилие на ободу колес P_k , расходуемое на преодоление сопротивления движения.

Вычтя из последнего величину сопротивления воздуха P_w , получают тяговое усилие P_a , идущее на преодоление сопротивлений качению и подъема. Кривая $P_a = f(V)$ и является тяговой характеристикой электрообойла.

Характеристики электродвигателя строят обычно в зависимости от силы тока (рис.6). Основными характеристиками являются кривые $M(I)$ и $n(I)$. Из этих кривых могут быть построены

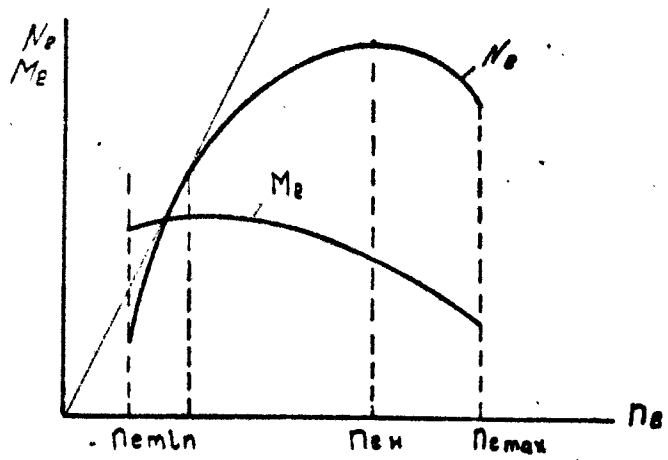


Рис. 5

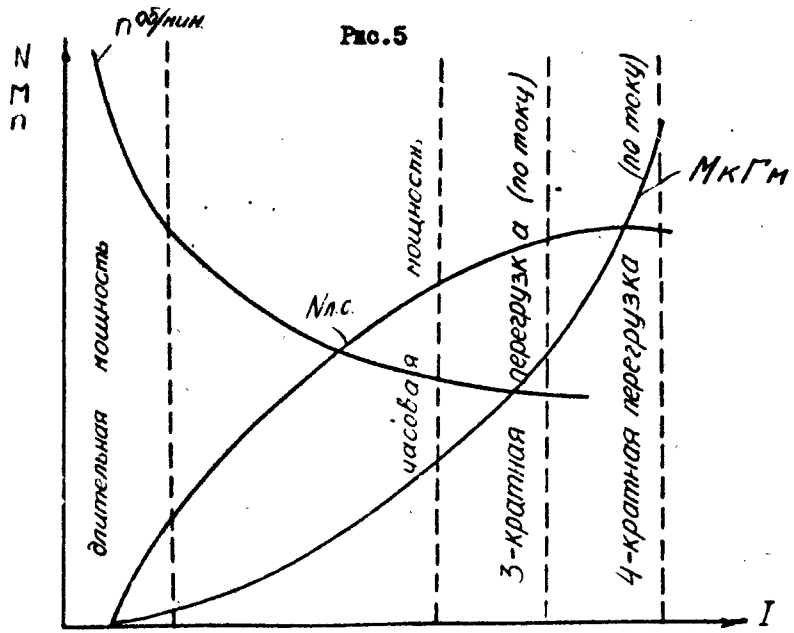


Рис. 6

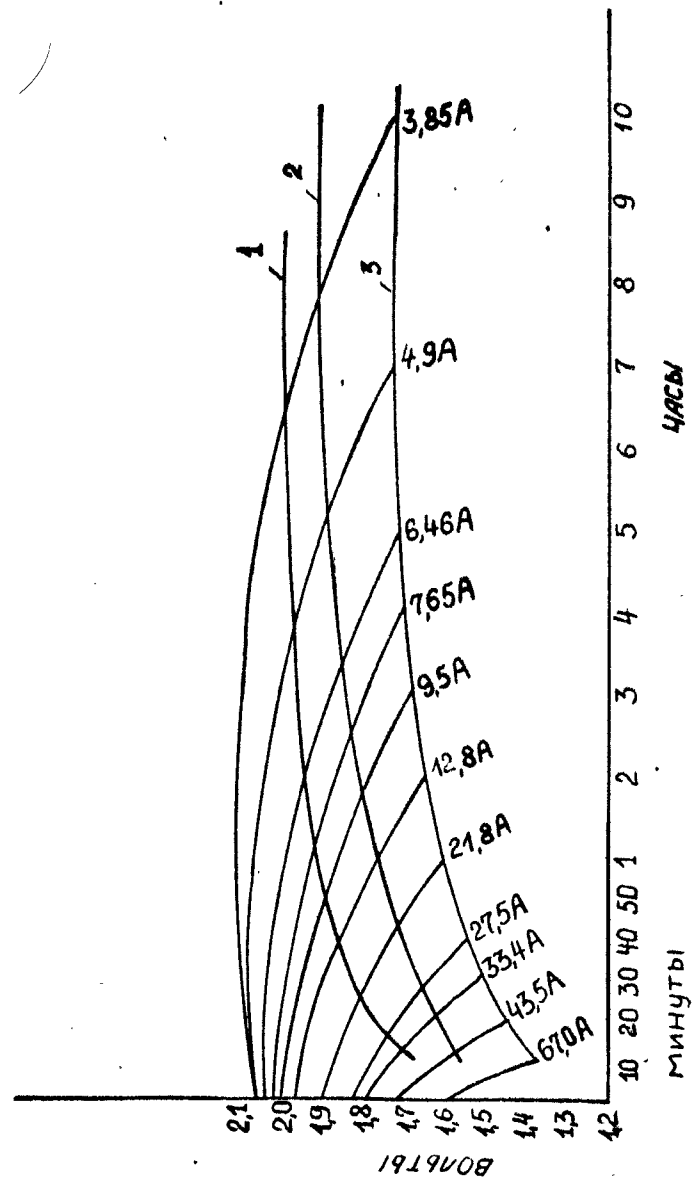


Рис. 7

Гос. публичная
научно-техническая
библиотека СССР
ЭЖСМГВР

кривые мощности $N(I)$ и КПД электродвигателя $\eta(I)$. Указанные характеристики строят обычно при $U = const$, однако, в случае работы электродвигателя от аккумуляторной батареи напряжение последней зависит от нагрузки (потребляемого тока) и степени разряженности батареи.

Изобразим характеристики напряжения аккумуляторной батареи (рис. 7). Перестроив кривые (рис. 7) в зависимости от силы тока, получим кривые рис. 8. Из них видно, что напряжение аккумулятора изменяется довольно значительно.

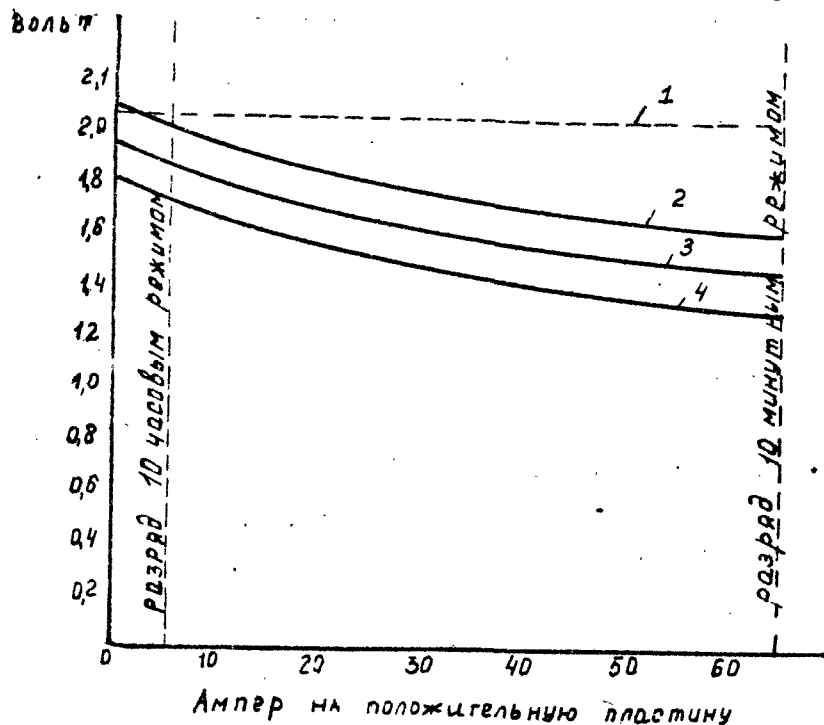


Рис. 8

Изменение напряжения в зависимости от степени разряженности батареи определяется конечным разрядным напряжением, устанавливаемым заводской инструкцией; для всех типов свинцовых аккумуляторов это изменение напряжения равно приблизительно 15% от номинального.

Для тяговых расчетов берут кривую среднего разрядного напряже-

ния. Чтобы кривые рис. 8 были характерны для батарей различной емкости данного типа, по оси абсцисс отложена не общая сила тока, а сила тока, приходящаяся на одну положительную пластину.

Кривые изменения напряжения при нагрузке, как видно из графика рис. 8, с достаточной для практики точностью можно считать прямыми.

Наклон кривой напряжения характеризуется величиной снижения напряжения в одном элементе батареи при нагрузке 100 А, которую обозначим U_{100} . Тогда среднее разрядное напряжение батареи может быть выражено уравнением

$$U_{\text{ср}} = n_1 \left(1.95 - \frac{U_{100} \cdot I}{100} \right), \text{ В.}$$

где 1,95 – среднее разрядное напряжение при очень малой нагрузке; n_1 – число элементов батареи.

Если мы знаем характеристики электродвигателя при постоянном напряжении, то их можно пересчитать на величину $U_{\text{ср}}$.

Пересчет проводится следующим методом (рис. 9).

Нанеся на график с характеристиками электродвигателя (рис. 9), снятыми при постоянном напряжении $U_{\text{ном}}$, напряжение батареи

$$U_{\text{ср}} = n_1 \left(1.95 - \frac{U_{100} \cdot I}{100} \right) \text{ В}$$

выбираем несколько значений I и при этих значениях пересчитываем точки кривой числа оборотов n пропорционально отношению среднего разрядного и номинального напряжения:

$$n' = n \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ном}}}$$

Далее, оставляя кривую $M(I)$ неизменной, исправляем кривые $N(I)$ и $\eta(I)$, подсчитывая их точки по формулам:

$$N' = \frac{M \cdot n}{716.2} \text{ л.с.};$$

$$\eta = \frac{N' \cdot 1.36 \cdot 10^3}{U_{\text{ср}} \cdot I}$$

Как видно из формул, мощность электродвигателя N' будет снижаться также пропорционально снижению числа оборотов n , коэффициент же полезного действия не изменится (поскольку в расчете мы пренебрегаем, как малой величиной, $I_a \cdot R$).

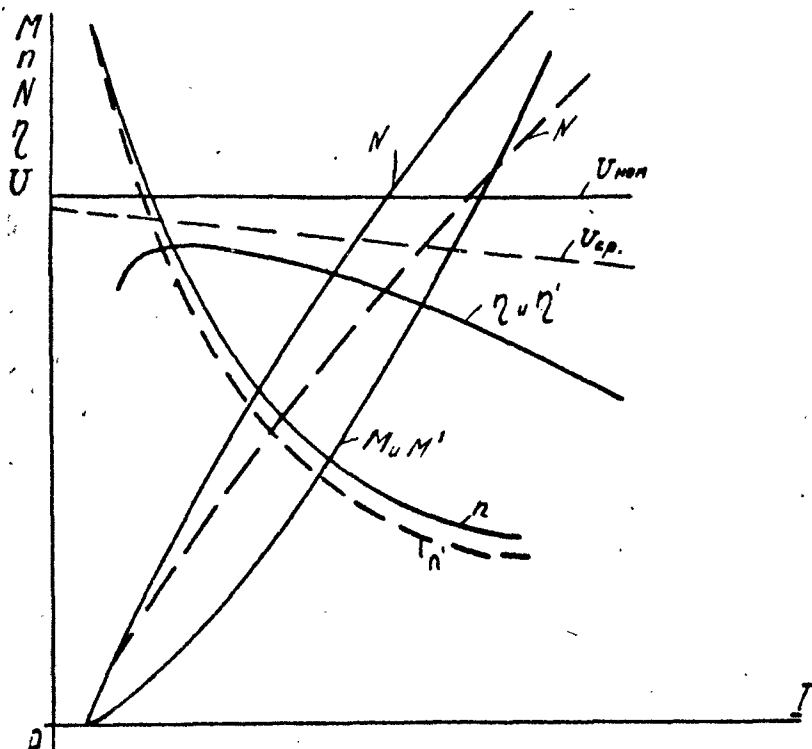


Рис.9

2. РАСЧЕТ СИСТЕМ С ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Расчетные параметры топливного модуля

1. Мощность $N_M = 1$ кВт.
2. Напряжение $U_M = 10$ В.
3. Напряжение на элементе модуля $U_{\text{эл}} = 0,75$ В.
4. Сила тока $I_M = 100$ А.
5. Плотность тока $i = 100$ мА/см².
6. Толщина электрода $\delta = 0,5$ мм.
7. Относительный размер электрода $\frac{\text{высота}}{\text{ширина}} = 2,2-2,5$.
8. Тип электрода - металлокерамический.

9. Счет электродов (2+2).
 10. Расстояния между электродами $\ell = 2,5$ мм.
 11. Сечение каналов: а) электролитного - $(0,5 \times 8)$ мм²;
б) газовых - $2(0,5 \times 3)$ мм².
 12. Вид герметизации электродов - при помощи упругих манжет.
- Принципиальная блок-схема топливного модуля представлена на рис.10.

Определение предварительных размеров модуля и числа электродных пар

Рабочая площадь электрода определяется из соотношения

$$S = B \cdot h = \frac{I_M}{2 \cdot i}, \text{ см}^2,$$

где B - ширина рабочей части электрода, см;
 h - высота рабочей части электрода, см, или

$$S = B \cdot h = \frac{100}{2 \cdot 0,1} = 500 \text{ см}^2,$$

Принимая ширину электрода $B = 15$ см, находим

$$h = \frac{500}{15} = 33,5 \text{ см}.$$

Так как уплотнение электрода в модуле обеспечивается манжетом, который охватывает его по всему контуру и закрывает 5-6 мм его линейных размеров, то окончательные размеры электрода равны:

$$\text{ширина } B_{\text{э}} = 15 + 1 = 16 \text{ см};$$

$$\text{высота } H_{\text{э}} = 33,5 + 1 = 34,5 \text{ см}.$$

При счете электродов (2+2) мы имеем 2 топливных электрода и 2 кислородных; все 4 электрода составляют условную пару, дающую напряжение $U_{\text{э}} = 0,75$ В и ток $I_M = 100$ А.

Число условных пар определяется из соотношения

$$n = \frac{U_M}{U_{\text{э}}}$$

или

$$n = \frac{10}{0,75} = 14.$$

Определение габарита топливного модуля

Общее число электродов в топливном модуле $N = 4 \cdot n$ (шт) или
 $N = 4 \cdot 14 = 56$ шт.

Из них: топливных $n_T = 28$ шт;
кислородных $n_K = 28$ шт.

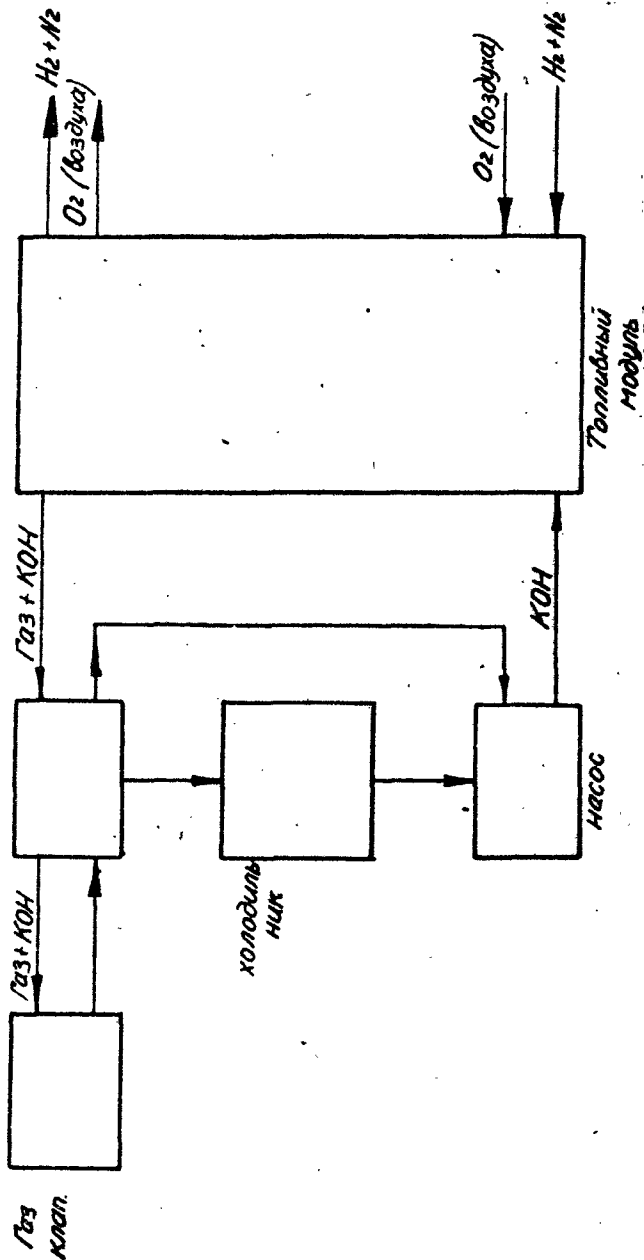


Рис. 10

Толщина электродного набора или предварительная длина модуля определяется из соотношения

$$L_{пр} = (n_r + n_k) \cdot \delta + (n_r + n_k + 1) \cdot e$$

или

$$L_{пр} = (28 + 28) 0,5 + (28 + 28 + 1) 2,5 \text{ мм};$$

$$L_{пр} = 170,5 \text{ мм}.$$

Окончательные размеры топливного модуля, включая контур циркуляции электролита (длина, ширина и высота), определяются конструктивными соображениями (рис. 11).

Прочностной расчет шпилек, стягивающих электродный набор

Расчетные данные:

число шпилек $\varphi = 12$;

материал шпилек Ст.50;

расчетный диаметр $d_p = 6,5 \text{ мм}$;

материал манжет - резина ИРИ 2002;

напряжение в резине при 30%-ном сжатии $\sigma_{сж} = 29 \text{ кг/см}^2$;

площадь сжатия (полоса по контуру электрода шириной 0,7 см) = 70 см^2 ;

усилие сжатия $P = 29 \cdot 70 = 2030 \text{ кг}$.

Напряжение растяжения (σ_p), которое испытывает шпилька при стягивании электродного набора, определяется из соотношения

$$\sigma_p = \frac{4P}{\varphi \cdot \pi \cdot d_p^2} \cdot \text{кг/см}^2$$

или

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot 2030}{12 \cdot 3,14 \cdot 0,65^2} = 510 \text{ кг/см}^2$$

Определение запаса прочности

Запас прочности определяется из соотношения

$$\frac{\sigma_{тек}}{\sigma_p}$$

Принимая во внимание, что для Ст-50 $\sigma_{тек} = 3800 \text{ кг/см}^2$, имеем

$$\frac{\sigma_{тек}}{\sigma_p} = \frac{3800}{510} = 7,4.$$

Превышение запаса прочности объясняется следующими причинами:

резьба М-8, которую имеют стягивающие шпильки, подходит сюда по конструктивным соображениям;

при герметизации электродного пакета, которая обеспечивается затяжкой шпилек, резина может быть сжата на 35-40%, что резко увели-

чит условие сжатия P ;

при движении электромобиля за счет вибрации консольно подвешенного топливного модуля на оттягивающие шпильки действует дополнительная нагрузка.

Электролитный насос

Каждый из восьми топливных модулей имеет свой сифонный электролитный насос (рис. II), который прокачивает электролит через систему "модуль-холодильник", причем для привода насоса используется энергия расширения аммиака.

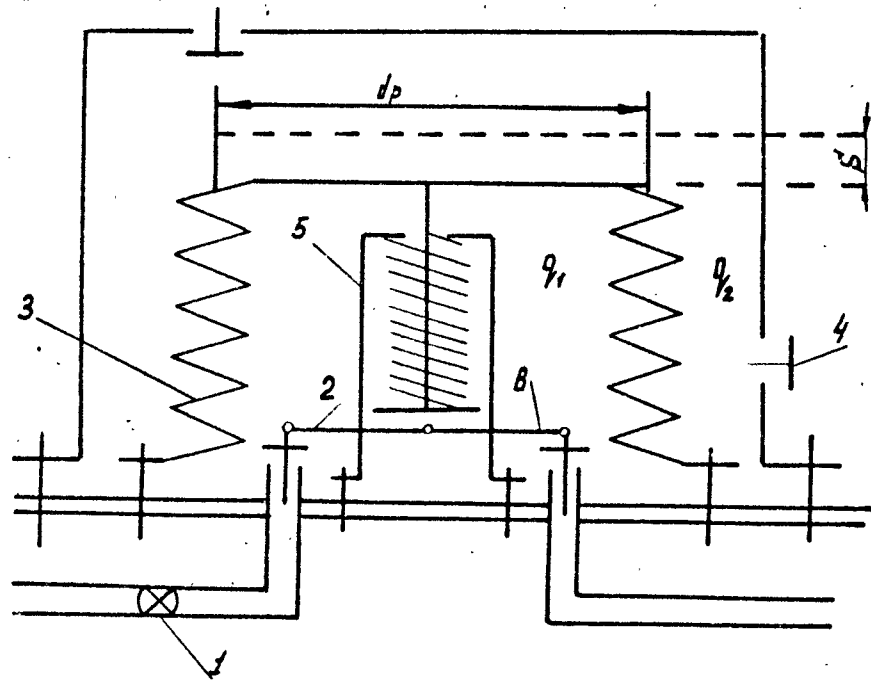


Рис. II

Аммиак в газообразном состоянии под давлением 1...6 атм в зависимости от степени открытия дроссельного крана I поступает через клапан 2 во внутреннюю полость q_1 сифона 3 и, расширяясь, заставляя его удлиняться на величину рабочего хода S . Уменьшающийся наружный объем q_2 выталкивает электролит через клапан 4 в топливный модуль. В конце рабочего хода происходит перекрытие клапанов и сифон под

воздействием пружины 5 начинает сжиматься, а аммиак через клапан 6 поступает в общий коллектор и далее в кренинг-аппарат.

Чем больше производительность Q сифонного насоса, тем больше расход q аммиака, проходящего через насос, причем расход аммиака не должен превышать 0,339 кг/ч, т.е. того количества, которое необходимо для генерирования 1 кВт.ч электроэнергии.

Число ходов сифонного насоса в единицу времени зависит от давления аммиака на входе в сифон и гидравлического сопротивления электролитного тракта топливного модуля. Практически число ходов в минуту лежит в интервале 5-60.

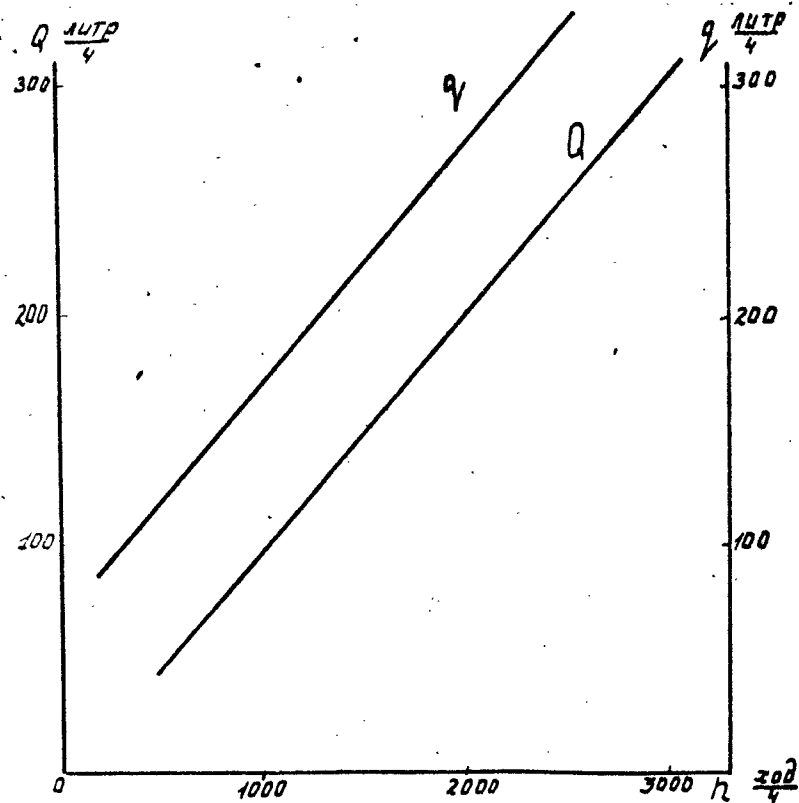


Рис. I2

Расчет электролитного насоса

Расчетные данные:

средний диаметр сальфона $d_p = 80$ мм;

рабочий ход сальфона $S = 20$ мм;

противодавление аммиака на выходе из сальфона

$$P_s = 1,4 \text{ кг/см}^2;$$

характеристика пружины:

сила 20%-ного сжатия—25кг;

сила 40%-ного сжатия—35кг;

число рабочих ходов 180...3000 ход/ч.

На рис.12 представлена зависимость производительности насоса Q и расхода аммиака q от числа рабочих ходов сальфона n .

Тепловой баланс топливного модуля

О п р е д е л е н и е количества тепла, выделяемого при работе с топливным модулем

Количество тепла Q_n , которое выделяется в единицу времени при генерировании электроэнергии в модуле, имеющем КПД = 50%, будет эквивалентно электрической мощности, отданной модулем во внешнюю цепь за эту единицу времени.

Следовательно, топливный модуль мощностью в 1 кВт выделяет в течение одного часа 864 ккал тепловой энергии. Это количество тепла должно быть отведено для обеспечения нормальной работы с таким расчетом, чтобы температура модуля сохранилась в пределах 75–85°C.

Из зарубежной информации, поступающей к нам, известно, что 75% этого тепла уходит в электролит и отводится холодильником, включенным в электролитный контур, а 25% отводится циркулирующей рабочей топливной смесью и воздухом, а также за счет излучения с поверхности топливного модуля.

Итак, количество тепла, отводимое электролитом Q_2 , определяется из соотношения

$$Q_2 = 0,75 Q_n$$

или

$$Q_2 = 0,75 \cdot 864 = 648 \text{ ккал/ч.}$$

Количество тепла, отводимое циркулирующей топливной смесью, воздухом и излучением, определяется из соотношения

$$Q_{ост} = 0,25 Q_n$$

или

$$Q_{ост} = 0,25 \cdot 864 = 216 \text{ к.кал./ч.}$$

Электролитный холодильник

В электролитном холодильнике охлаждается электролит, поступающий из топливного модуля, с которым он механически и гидравлически связан. Сальфонный насос, включенный в электролитный контур, обеспечивает циркуляцию горячего электролита.

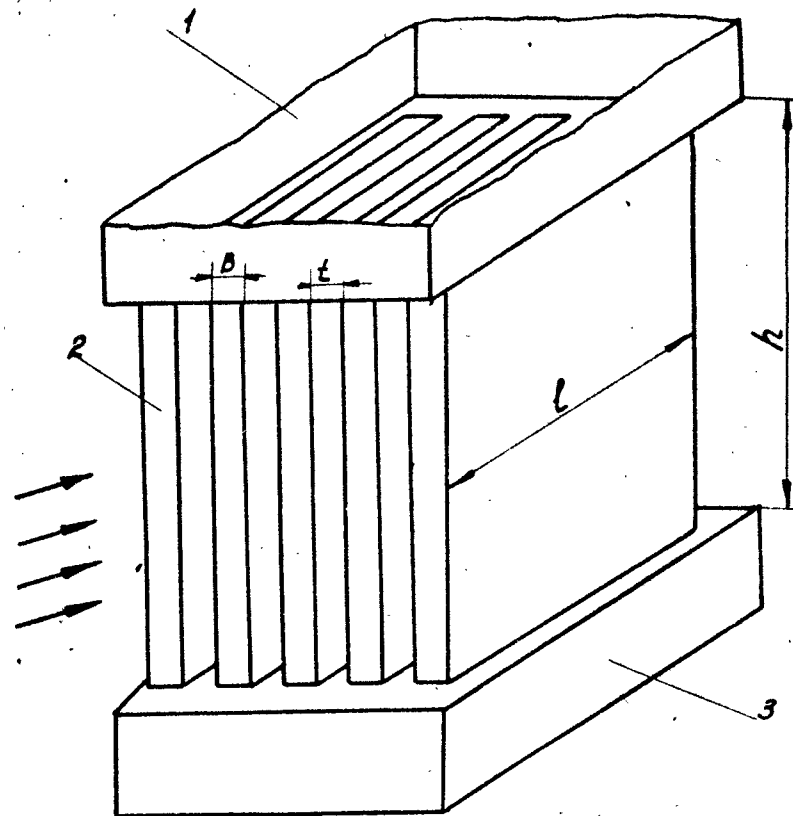


Рис.13

Электролитный холодильник (рис.13) состоит из верхнего сливного бака 1, который посредством полых ребер 2 соединен с нижним баком 3. Горячий электролит охлаждается, проходя из верхнего бака по внутренней поверхности полых ребер в нижний, так как в направлении перпендикулярном движению электролита (между ребер) продувается окружающий воздух, нагнетаемый вентилятором.

Определение величины охлаждающей поверхности
носта холодильника

Расчетные данные:

Количество тепла, снимаемое холодильником, $Q_2 = 640$ ккал/ч.

Конденсатор водяных паров

Конденсатор водяных паров ставится в контур циркуляции топливной смеси. Увлажненная водяным паром топливная смесь осушается в конденсаторе, после чего подается на топливные электроды, находящиеся в модуле. Омывая их, топливная смесь снова увлажняется водой образующейся в порах топливных электродов при генерировании электрической энергии.

Конденсатор водяных паров (рис.14) состоит из верхнего сборника I, в который через патрубок 2 входит увлажненное топливо. Проходя внутри трубок теплообменника 7, влага, находящаяся в топливе, конденсируется на стенках трубок и стекает по ним в нижнюю часть конденсатора - водяной коллектор 6. В нижней части коллектора имеется гидрофильная пористая диафрагма 4, которая пропускает воду и не пропускает газообразное топливо. Подоушенное топливо поступает в патрубок 5 топливного компрессора, обеспечивающего циркуляцию топлива в контуре.

Для того чтобы конденсация влаги протекала интенсивно, в теплообменник 7 через штуцер 3 поступает жидкий аммиак. Попадая в околотрубное пространство, он испаряется, отнимая тепло, образующееся при конденсации водяных паров.

Отработанный в теплообменнике аммиак через патрубок 8 поступает в систему подготовки топлива.

Определение величины охлаждающей поверхности
конденсатора

Расчетные данные:

количество конденсирующейся воды (с 4 модулей)

$$G_{H_2O} = 4 \times 0,45 = 1,8 \text{ кг/ч};$$

количество топливной смеси, проходящей через конденсатор.

$$G_{H_2 \cdot N_2} = (0,383 \times 5) \cdot 4 = 7,66 \text{ кг/ч};$$

состав топливной смеси - 75% H + 25% N (по объему);

количество входящего в конденсатор аммиака

$$G_{NH_3} = 1,356 \text{ кг/ч}.$$

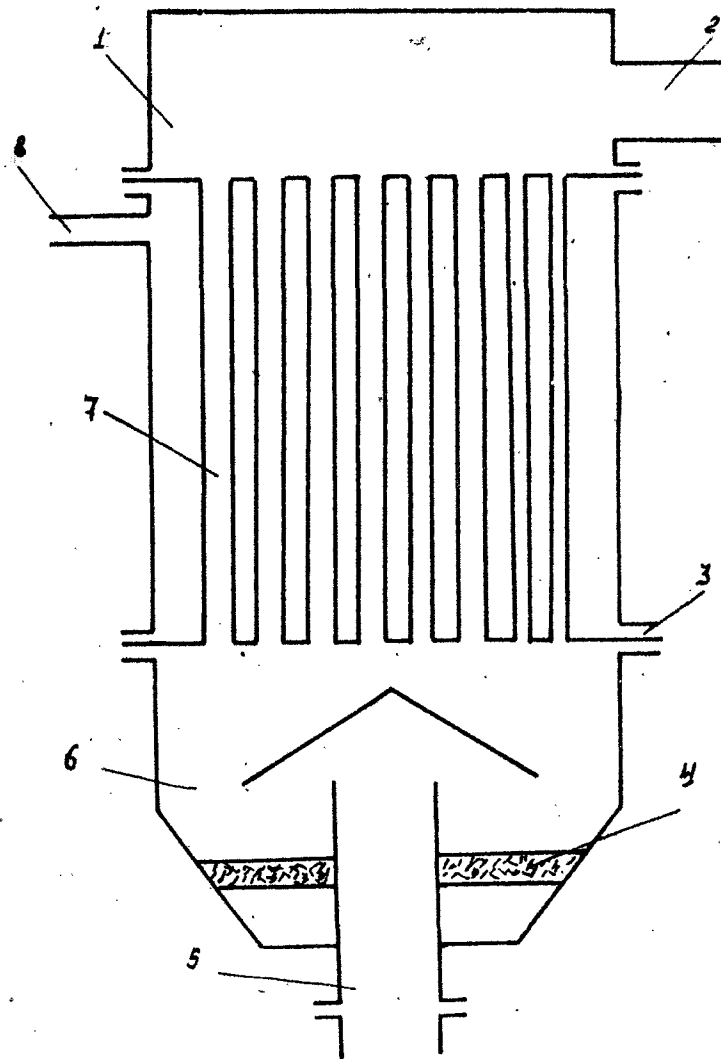


Рис.14

Энергосиловая установка электромобиля (рис.15)

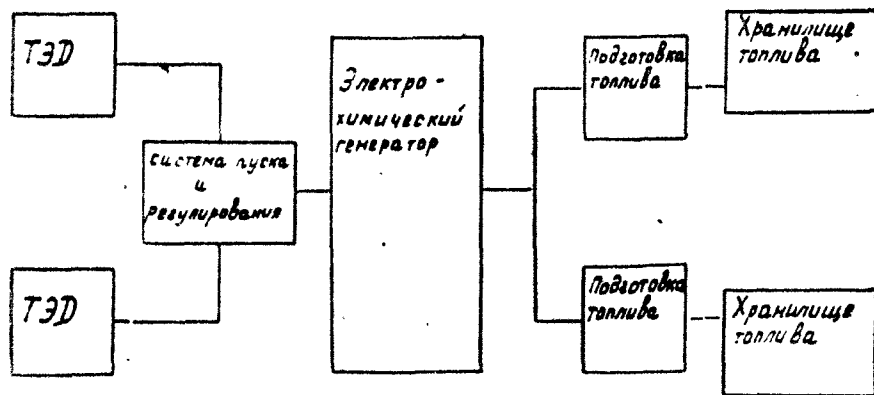


Рис.15

Движение электромобиля осуществляется при помощи электродвигателей, получающих питание от электрохимического генератора, непосредственно преобразующего химическую энергию топлива в электрическую.

В состав энергосиловой установки входят:

- электрохимический генератор;
- устройство для подготовки топлива и окислителя;
- устройство для хранения топлива;
- два тяговых электродвигателя постоянного тока (ТЭД);
- система пуска и регулировки электродвигателей.

В проектируемый электрохимический генератор входят:

- батарея, состоящая из восьми топливных модулей, преобразующих химическую энергию топлива в электрическую;
- система, обеспечивающая работу батарей топливных модулей.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМ С ВЫСОКОЕМКИМИ АККУМУЛЯТОРАМИ

Исследование и развитие топливных элементов (ТЭ), начатое в этом десятилетии, показало их перспективность в качестве источника энергии для экипажа. Успешное использование ТЭ на космическом корабле типа *Gemini* повысило интерес к ним. Однако вопросы стоимости, срока службы, простоты и надежности ТЭ препятствовали их практическому использованию.

В последние годы развитие воздушно-цинковых (В-Ц), оеронат-ртутных (Na-S) и других высокоемких аккумуляторов создало новую техническую основу для повышения интереса к электромобилям.

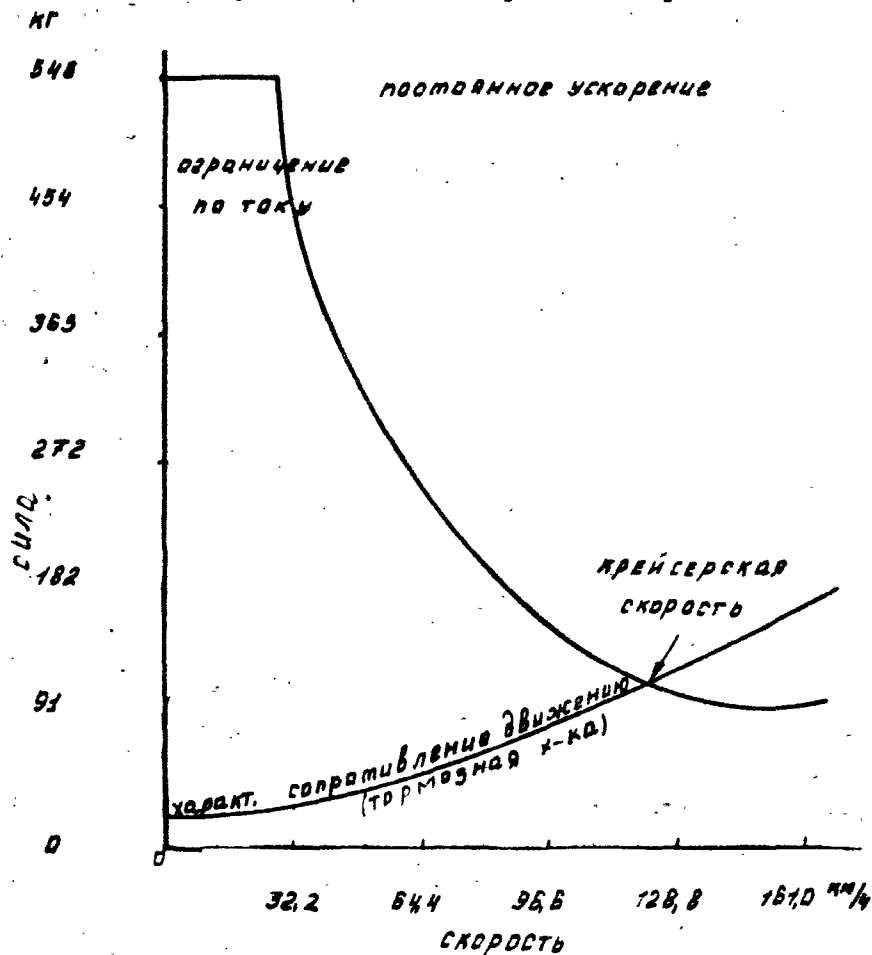


Рис.16

На рис.16 представлена зависимость веса, необходимой для разгона 2-тонного экипажа, от его скорости. Горизонтальная линия, проходящая несколько ниже отметки 546 кг, определяется конструктивными ограничениями (в данном случае максимальным ускорением, равным 14,6 км/ч за секунду) и ограничением по току двух тяговых

двигателей постоянного тока. На рис.16 представлена также и тормозная характеристика. Тяговая характеристика рассчитана так, чтобы точка переосечения с тормозной характеристикой соответствовала скорости 130 км/ч и выбиралась из соображения достаточно положительного ускорения в диапазоне до скорости 80 км/ч.

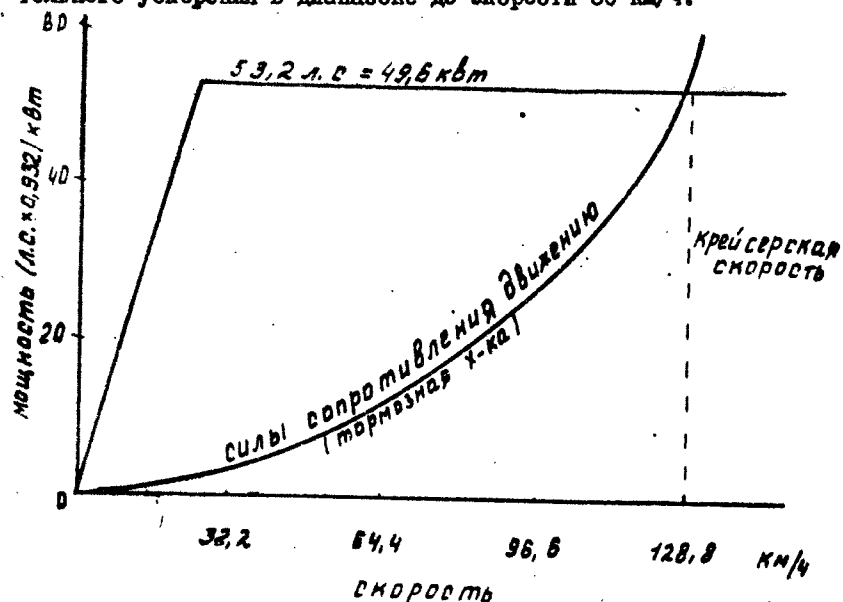


Рис.17

На рис.17 показан график зависимости потребной мощности от скорости движения. Около 50 кВт требуется для достижения максимальной скорости 130 км/ч.

На рис.18 показаны величина тока двигателя и потребляемая мощность для заданного цикла движения.

На верхней диаграмме представлен график разгона до скорости 80 км/ч, движение с установившейся скоростью и равномерное торможение. Значение замедления при торможении принято равным 8 км/ч за секунду, хотя конкретное значение замедления для данного анализа не столь важно.

Средняя диаграмма показывает изменение тока якоря и тока обмотки возбуждения, регулирование которых осуществляется раздельно. На диаграмме видно, что ток якоря остается постоянным в период разгона машины и затем падает до величины, необходимой для поддержания

постоянной скорости движения. В то же время ток обмотки возбуждения имеет постоянную величину в период трогания с места и затем уменьшается по мере возрастания скорости. При переходе с разгона на установившуюся скорость этот ток несколько увеличивается. В данном примере генераторное торможение не рассматривалось, поэтому при тормозном режиме ток обоих двигателей экипажа равен нулю.

На нижней диаграмме показана мощность, развиваемая каждым двигателем за период рассматриваемого цикла. Максимальная мощность не равна номинальной мощности двигателя. Тяговые двигатели допускают продолжительные перегрузки. Выбор двигателя в методике не рассматривается.

На основе конкретного электроавтомобиля была составлена математическая модель и разрабатывается аналоговая программа. Для анализа был выбран 2-тонный экипаж с Ц-В-батареей весом 454 кг соответствующей мощности.

Чтобы провести полный анализ, должны быть определены некоторые свойства аккумуляторов. Сюда входят данные по характеристике заряда и разряда батареи, емкость и максимальное напряжение.

Технические свойства электроавтомобиля иллюстрируют рис.19 и 20, а также табл.4. На рис.19 показан график разгона до скорости 80 км/ч с последующим торможением. В отличие от рис.19, на рис.20 изображен период движения с установившейся скоростью. Диапазон движения с установившейся скоростью может быть изменен (для машинной программы удобно изменять диапазон по геометрической прогрессии). Во всех случаях разгон происходит при ускорении A_0 , равном 14,5 км/ч за секунду.

Более существенным показателем свойства батареи являются данные, приведенные в табл.5. В графе "Количество км в цикле" имеется в виду расстояние, соответствующее ординате рис.19 и 20, на основании которой рассчитывается средняя скорость, максимальный радиус пробега, расчетный вес двигателей и передачи. Заметим, что с увеличением количества км в цикле увеличивается максимальный радиус пробега при одном и том же весе аккумуляторов.

Поскольку требуемая мощность двигателей известна применительно к экипажу, разгоняющемуся и движущемуся на максимальной скорости, можно на основании расчетной программы рассчитать потребную энергию для определенного движения. Можно также рассчитать удельную и общую емкость батарей, требуемую для каждого цикла ускорения,

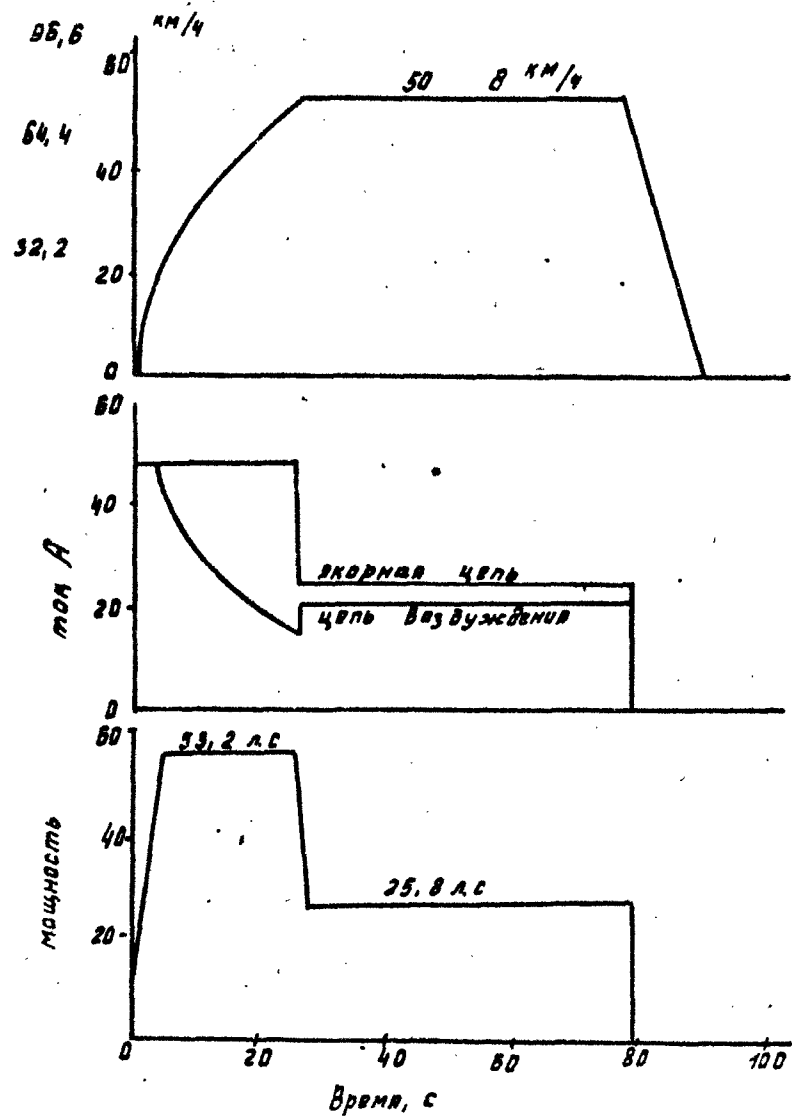


Рис. 18

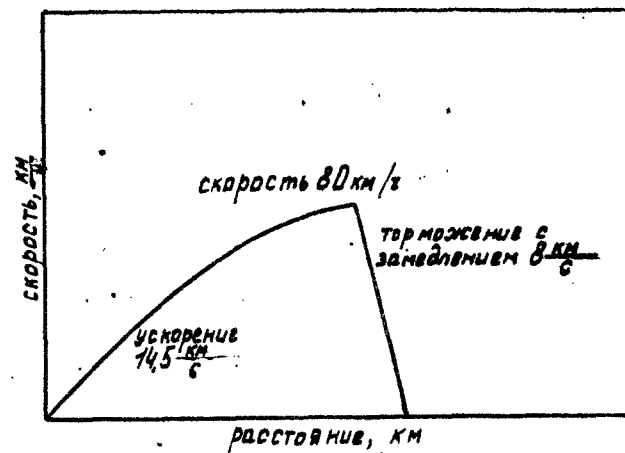


Рис. 19

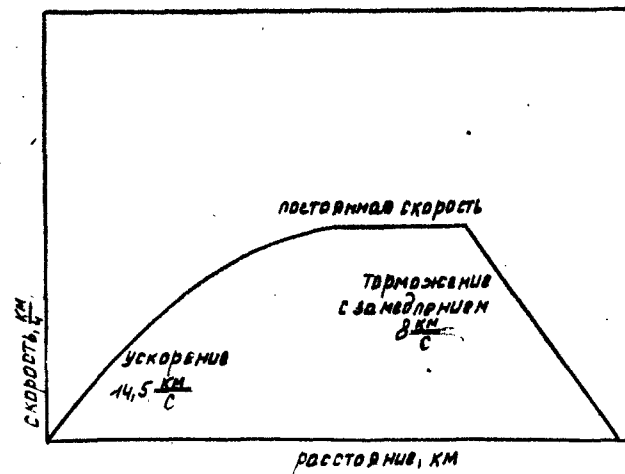


Рис. 20

Таблица 4
Результаты расчета типового электромобиля

| Наименование параметров | Параметры |
|---|-----------|
| <u>Постоянные величины</u> | |
| Максимальная скорость по ровной дороге, км/ч | 128,8 |
| Ускорение замедления, км/с | 8 |
| <u>Исходные данные</u> | |
| Вес автомобиля, т | 2 |
| Начальное ускорение, км/с | 14,5 |
| Вес В-Ц-батарей, кг | 454 |
| Напряжение батареи при движении, В | 72 |
| Крейсерская скорость, км/ч | 80 |
| <u>Результаты расчета</u> | |
| Максимальная мощность двигателя, приведенная к ободу колеса, л.с. | 26,6 |
| Удельная нагрузка на аккумулятор при полной мощности, Вт/кг | 107 |
| Скорость, достигнутая при полной мощности, км/ч | 18,1 |
| Ускорение при полной мощности, км/с | 14,2 |
| Ток аккумулятора при полной мощности, А | 689 |
| Вес управляющей аппаратуры, кг | 19,6 |
| Объем управляющей аппаратуры, см ³ | 2760 |
| Ускорение при достижении крейсерской скорости, км/с | 2,25 |
| Мощность, развиваемая двигателем при установившейся скорости движения, л.с. | 8,45 |
| Силовой ток на установившейся скорости движения, А | 218,7 |
| Удельная нагрузка аккумулятора при рейсовой скорости, Вт/кг | 35,4 |

Таблица 5
Расчетные данные, полученные на вычислительной машине

| Количество км в цикле | Средняя скорость, км/ч | Радиус пробега, км | Вес передач и двигателя ^{х)} , кг |
|-----------------------|------------------------|--------------------|--|
| 0,332 | 46,8 | 108 | |
| 0,403 | 51,7 | 124 | 197 |
| 0,515 | 55,0 | 146 | 189 |
| 0,643 | 59,7 | 169 | 181 |
| 0,805 | 63,0 | 193 | 173 |
| 1,02 | 64,3 | 217 | 166 |
| 1,28 | 67,8 | 245 | 158 |
| 1,61 | 69,2 | 267 | 152 |
| 2,58 | 72,5 | 310 | 140 |
| 3,12 | 74,0 | 330 | 134 |
| 4,03 | 75,8 | 346 | 130 |
| 6,43 | 77,3 | 374 | 122 |
| 8,05 | 77,3 | 385 | 120 |
| 16,1 | 79 | 405 | 113 |
| 25,8 | 79 | 416 | 110 |
| 31,2 | 79 | 420 | 109 |
| 40,3 | 79 | 422 | 108 |
| 64,3 | 79 | 425 | 107 |
| 80,5 | 79 | 426 | 107 |

х) Вес двухмоторной тяговой трансмиссии на постоянном токе, необходимой для длительной работы при данном ходовом цикле.

движения, торможения. По энергии, необходимой для одного цикла, легко рассчитать общую емкость для всего перемещения. Очевидно, что при данном объеме для движения с большим количеством остановок и пусков общий радиус пробега короче, чем при длительном движении с крейсерской скоростью. Используя этот метод расчета, можно рассчитать максимальный пробег экипажа точнее, чем при ранее применявшемся способе расчета по среднему движению.

Изменение диапазона 2-тонного экипажа в зависимости от величины пробега (км за цикл) при ускорении от 454 кг В-Ц-батарея показана на рис.21.

Диапазон движения для скоростей 80 км/ч и 125 км/ч дан в зависимости от числа пройденных км за цикл. Расчеты показывают снижение диапазона движения с увеличением рейсовой скорости и веса экипажа. Это происходит даже в том случае, если общий вес аккумуляторов пропорционально увеличивается.

Данные В-2-аккумуляторов приведены на рис.22, где представлены кривые зависимости напряжения и расхода энергии для батарей В.

Рис.23 иллюстрирует зависимость между емкостью батарей, выраженной в Вт·ч/кг, и плотностью выделяемой мощности, имеющей размерность Вт/кг. На рис.23 обозначены области кривой, интересующие нас с точки зрения мощности, необходимой для разгона и преодоления большей дистанции.

Требование совмещения обеих областей (свойств) ясно показывает необходимость создания гибридных источников энергии. Так как высокая энергоемкость и высокая плотность не совместимы в одной батарейной системе, может быть предложена двойная батарейная система. Свойства такой системы иллюстрирует рис.24, на котором изображен ток, имеющий положительное значение по обе стороны от координат напряжения для двух аккумуляторов, один из них имеет высокую емкость, другой - высокую приемность.

В такой системе высокоемким источником может быть аккумулятор или топливный элемент, а другим источником мощности может быть любой аккумулятор (или другая система с высокой приемностью), способный допускать большие токовые перегрузки, необходимые для разгона.

Источник большой емкости может быть использован для подзарядки источника с высокой приемностью во время остановок, если последний является аккумулятором.

Таким образом, компьютерная программа дает возможность определить те показатели, по которым можно оценить электромобиль. Предварительная научная база, основанная на использовании В-Ц-аккумуляторов, позволяет проводить оценку радиуса движения экипажа при любых возможных режимах.

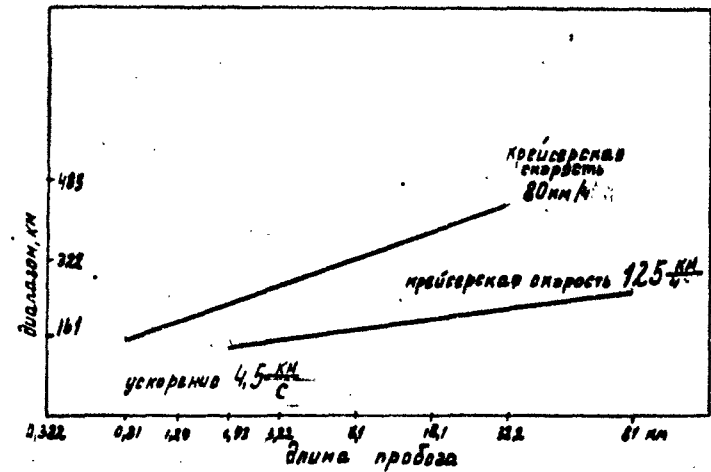


Рис.21

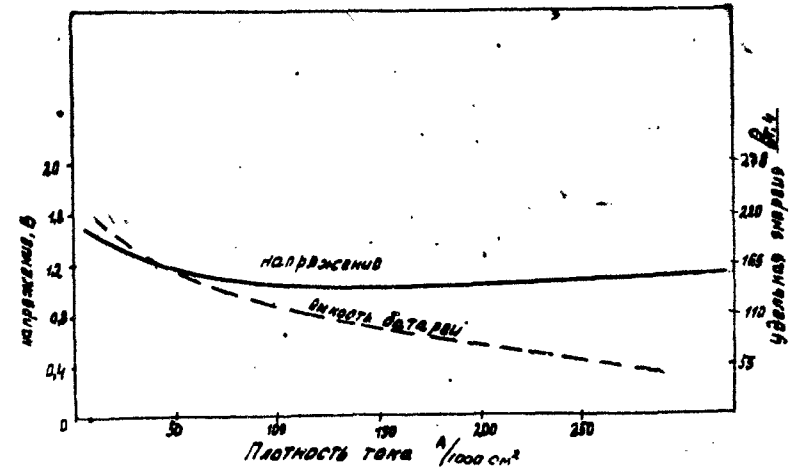


Рис.22

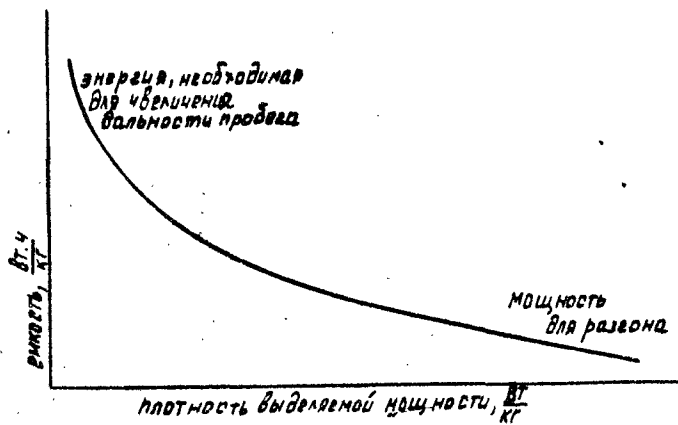


Рис.23

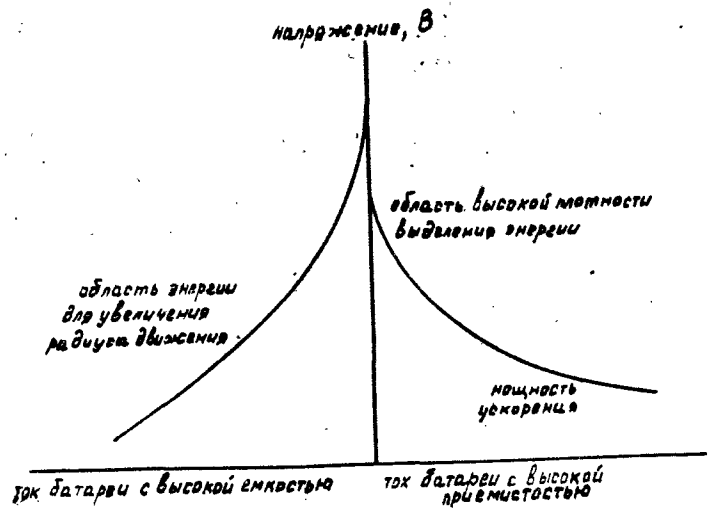


Рис.24

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ОДНОТИПНЫМИ И КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОСИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Исследования систем электропривода электромобилей с одноклассными и комбинированными установками проведены в МСИ и ВНИПИИ П.О. "Динамо" под руководством И.С.Ефремова, А.П.Пролигина и Б.П.Гущо-Малкова.

Определяющим фактором в создании электромобильного транспорта, конкурентоспособного с современным автотранспортом, является решение проблемы его автономной энергетики. Параметры агрегатов автономной системы электропривода электромобилей и требования к ним существенно различаются в зависимости от назначения и областей применения электромобильного транспорта.

Ниже приведены результаты оценки мощностных и энергетических параметров энергоустановок двух основных типов электромобильного подвижного состава: городских электромобилей, эксплуатируемых на усовершенствованном дорожном покрытии (коэффициент сопротивления движению $\psi = 0,014-0,016$) с обеспечением высоких тягово-динамических качеств (максимальная скорость $V = 80-120$ км/ч) при частых остановках, и карьерного электромобильного транспорта, для которого характерно движение по специальному покрытию ($\psi = 0,02-0,06$) с преодолением уклонов до 18%, длительным электродинамическим торможением и транспортными скоростями в рабочем режиме 15-25 км/ч, в нерабочем - 50-60 км/ч.

При выборе источника энергии для энергоустановок городского электромобиля оценивают два основных эксплуатационных аспекта.

П е р в ы й базируется на использовании в качестве источника энергии для движения электромобилей современных аккумуляторных батарей. Из-за низких энергетических и весовых показателей свинцово-кислотных и щелочных аккумуляторов использование электромобилей в черте города возможно в небольших, четко ограниченных районах.

В о в т о р о м случае электромобиль рассматривают как транспортное средство, обеспечивающее основной объем городских перевозок и по своим параметрам позволяющее заменить автомобили с двигателями внутреннего сгорания. Только в этом случае в настоящее время становится возможным существенное расширение типажа и увеличение количества электромобильного подвижного состава,

достижение оспоставимого процента электромобилей и автомобилей, обслуживающих городские перевозки и, следовательно, создание реальной основы для снижения загазованности городов, уменьшения шума и подготовки технических предпосылок для дальнейшего совершенствования экономики транспорта.

Для оценки удельных мощностных и энергетических параметров перспективного электромобильного подвижного состава были исследованы пассажирские и грузовые городские электромобили и электробусы различного назначения и полезной нагрузки, обеспечивающие объем перевозок, сопоставимый с автотранспортом, и перспективный самосвалный карьерный электромобильный транспорт грузоподъемностью 75-180 т. Их тягово-динамические качества, характеризующиеся зависимостями $V_n(t)$ (рис.25), были приняты аналогичными автомобильному подвижному составу, а запас хода и скорости движения - обеспечивающими заданный дневной объем перевозок с соответствующими транспортными циклами в зависимости от назначения машины. На рис.: 1 - легковые и грузопассажирские автомобили; 2 - автобусный и грузовой транспорт; 3 - легковые электромобили; 4 - грузовые электромобили; 5 - электробусы; 7 - самосвалный карьерный транспорт; 8 - аэродромные тягловые с электроприводом.

Пренебрегая незначительным расходом энергии на питание вспомогательных систем, определим требуемую удельную мощность энергоустановки электромобиля:

$$\rho = \frac{P_n \cdot \eta_2}{G_{эу}}, \quad (1)$$

где P_n - мощность на ведущих колесах; η_2 - эксплуатационный (энергетический) КПД.

Масса энергоустановки $G_{эу}$ по результатам весового анализа электромобилей, выпущенных в последние годы в нашей стране и за рубежом, принималась равной для городских легковых и грузопассажирских электромобилей 25%, для электробусов - 20% и электромобилей-самосвалов 9-11% по отношению к собственной массе (рис.26). На рис.26 изображена зависимость относительной массы энергоустановки от собственной массы электромобилей, где 1 - легковые; 2 - грузовые; 3 - электробусы; 4, 5 - турбогенераторные аккумуляторные электромобили.

Диапазон изменения необходимой энергии энергоустановки электромобиля и обеспечение заданного пробега для соответствующего ти-

па машины определится из выражения

$$\eta_2 = \frac{n \cdot A_{тр} \cdot \eta_1}{G_{эу}}, \quad (2)$$

где $A_{тр}(P_n, t_i)$ - полезная работа электромобиля по преодолению сил сопротивления движению в течение транспортного цикла;

n - число транспортных циклов.

Изменение требуемой мощности $P_n(t)$ на ведущих колесах может быть определено по зависимостям $v(t)$, характеризующим необходимые тягово-динамические качества электромобильного подвижного состава (рис.26), и выражением

$$P_n = \frac{G(1+\gamma) \cdot a \cdot v}{g \cdot 3.6} + \frac{G \psi \cdot v}{3.6} + \frac{\kappa F v^3}{3.6^3}, \quad (3)$$

где κF - фактор обтекаемости экипажа, имеющего силу F ;

G - полная масса электромобиля;

$1+\gamma$ - коэффициент инерции вращающихся масс;

a, g - ускорения, соответственно, электромобиля и силы тяжести.

На удельные показатели энергоустановки влияют не только конструктивные показатели агрегатов системы электропривода, но и режим движения, а также условия эксплуатации электромобиля; в системах электропривода с комбинированными энергоустановками учитываются, кроме того, относительное время работы каждого источника, мощность и потери в зависимости от схемы передачи энергии на ведущие колеса за транспортный цикл.

Влияние всего комплекса факторов на энергетическую экономичность автономной системы электропривода учитывалось эксплуатационным КПД системы электропривода η_2 , под которым понимается отношение полезной работы $A_{тр}$ по преодолению электромобилем сил сопротивления движению к общему расходу энергии за транспортный цикл A_0 , запасенной в той или иной форме в энергоустановке электромобиля.

Таким образом, общее выражение для эксплуатационного КПД автономной системы электропривода электромобиля имеет вид

$$\eta_2 = \frac{\sum_1^n A_{тр}}{\sum_1^n A_0} = 1 - \frac{\sum_1^n \Delta A}{\sum_1^n A_0}, \quad (4)$$

где

$$\Delta A = \Delta A_{эу} + \Delta A_{пр} - \quad (5)$$

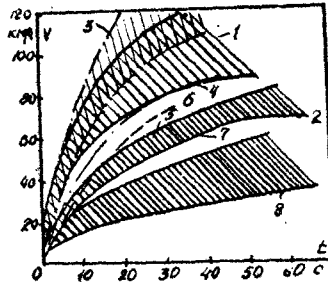


Рис.25

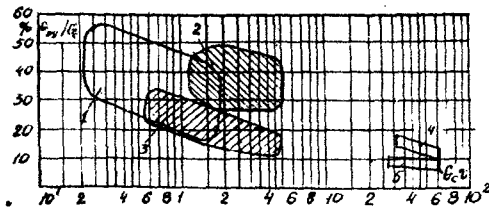


Рис.26

суммарный расход энергии на компенсацию потерь в элементах системы электропривода (в энергоустановке $A_{э.у}$ и электроприводе $A_{пр}$ за цикл).

Величина ΔA и составляющие A_0 , $A_{э.у}$ и $A_{пр}$ изменяются в зависимости от расчетного цикла типа энергоустановки и схемы передачи энергии на ведущие колеса. В частности, при работе исследованных систем электропривода городских электромобилей с одноступенными и комбинированными энергоустановками в расчетных транспортных циклах выражения для величин A_0 , $A_{э.у}$ и $A_{пр}$ в (4) и (5) записаны ниже.

1. Для электропривода с одноступенной аккумуляторной энергоустановкой (рис.25)

$$\sum_1^n A_{0и} = A_{0с} = P_{0с} t_{0с} \zeta_{0с} \quad (6)$$

работа заряда аккумуляторной батареи для обеспечения транспортных циклов с КПД по энергии в течение времени заряда $t_{0с}$ мощностью $P_{0с}$:

$$\Delta A_{зуд} = \int \Delta P_0 dt \quad (7)$$

суммарный расход энергии на компенсацию потерь при разряде аккумуляторной батареи за время пуска t_n и установившегося движения (рис.26);

$$\Delta A_{под} = \int_0^T (\Delta P_p + \Delta P_a + \Delta P_n) dt, \quad (8)$$

где ΔP_p , ΔP_a и ΔP_n - потери мощности, соответственно, в системе регулирования, тяговом двигателе и передаче за транспортный цикл T .

2. Для электропривода с машинным преобразователем в энергоустановке

$$A_{об} = Q = q_T G_T \quad (9)$$

общая потенциальная энергия энергоустановки/электромобиль, запасенная в топливе с теплотворной способностью q_T для обеспечения работы в течение транспортного цикла (G_T - масса топлива);

$$\sum_1^n \Delta A_{зуд} = n \int_0^{t_n+t_y} (\Delta P_{ид} + \Delta P_r) dt \quad (10)$$

суммарный расход энергии на компенсацию потерь, соответственно, в тепловом двигателе $\Delta P_{га}$ и генераторе $\Delta P_{г}$.

3. Общая потенциальная энергия однофазной энергоустановки при запасании в ней окислителя и топлива

$$A_{об} = Q = \eta_T \cdot G_T + \eta_0 G_0, \quad (II)$$

где η_0, G_0 - окислительная способность и масса окислителя.

Расход энергии на компенсацию потерь в топливной батарее $\Delta P_{тб}$ и обеспечение ее работы за цикл

$$\Delta A_{зуб} = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_{тб} dt. \quad (I2)$$

Величина $\Delta A_{пра} = \Delta A_{прб} = \Delta A_{прв}$ определится из (8).

4. Для системы электропривода с комбинированной энергоустановкой

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta A_{зуб} = n \left[\int_0^{t_1} (\Delta P_{га1} + \Delta P_{г1}) dt + \right. \\ \left. + \int_0^{t_2} (\Delta P_{га12} + \Delta P_{г12}) dt + \int_0^{t_3} \Delta P_{зр} dt + \int_0^{t_4} \Delta P_{з3} dt, \right] \quad (I3) \end{aligned}$$

где $\Delta P_{га1}$, $\Delta P_{га12}$ - энергия на компенсацию потерь в тепловом двигателе при работе, соответственно, на тягу и подзаряд аккумуляторной батареи; $\Delta P_{г1}$, $\Delta P_{г12}$ - то же, в генераторе; $\Delta P_{зр}$, $\Delta P_{з3}$ - то же, в аккумуляторной батарее.

При данной схеме привода остающаяся

$$\Sigma \Delta A_{пр} = (\Delta A_p + \Delta A_a + \Delta A_n) \cdot n, \quad (I4)$$

где

$$\Delta A_p = \int_0^{t_1} \Delta P_{р1} dt + \int_0^{t_2} \Delta P_{р2} dt + \int_0^{t_3} \Delta P_{р12} dt - \quad (I5)$$

суммарные потери энергии в системе регулирования при работе первого источника $\Delta P_{р1}$, второго $\Delta P_{р2}$ и потери $\Delta P_{р12}$ при подзаряде второго источника первым;

$$\Delta A_a = \int_0^{t_1} \Delta P_{а1} dt + \int_0^{t_2} \Delta P_{а2} dt - \quad (I6)$$

то же, в двигателях при работе от первого источника $\Delta P_{а1}$ и

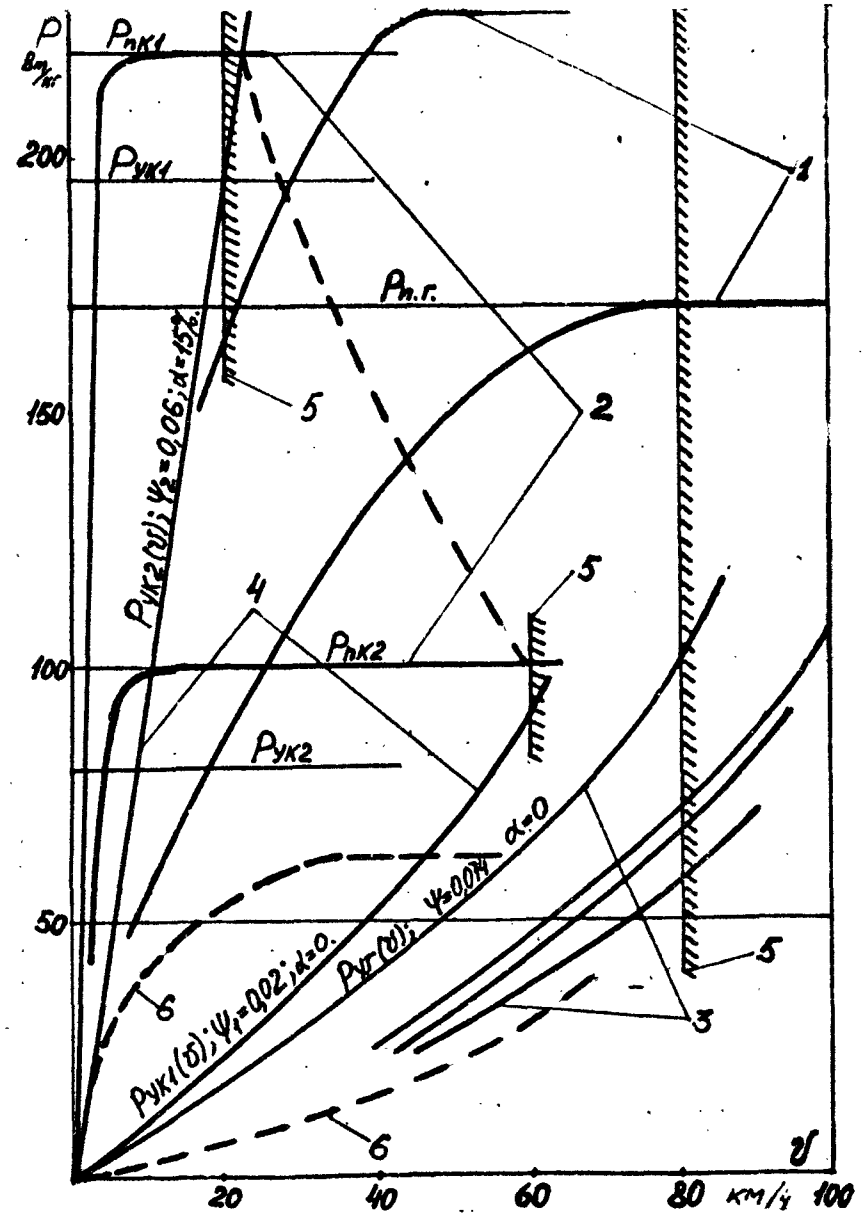


Рис.27

от второго ΔP_{n2} ;

$$\Delta A_n = \int_0^{t_1} \Delta P_{n1} dt + \int_0^{t_2} \Delta P_{n2} dt - \quad (17)$$

то же в тяговой передаче при работе от первого источника (ΔP_{n1}) и от второго (ΔP_{n2}).

Величина $A_{об}$ определится так же, как и $A_{об}$.

Аналогично значения $\Delta A_{эу}$, $\Delta A_{пр}$ и $A_{об}$ были найдены для расчетных циклов самоосвальных электромобилей.

С учетом (5)–(17) по зависимости (4) были найдены значения η для расчетных транспортных циклов электромобильного подвижного состава и для определения удельных параметров по формулам (1) и (2).

С учетом принятых динамических и относительных весовых показателей и КПД на рис.27 приведены результаты оценки требуемой удельной мощности энергоустановок городских и карьерных грузовых электромобилей в зависимости от установившейся скорости движения на горизонтальном участке дороги $P_y(V)$ о диапазоне изменения сопротивления движению, указанным выше, и в зависимости необходимой удельной максимальной мощности энергоустановки от скорости в период пика $P_n(V)$, определяемых заданной динамикой машин.

Результаты расчета удельных мощностей и энергетических показателей энергоустановок по зависимостям (1) и (2) для подвижного состава городского и карьерного самосвального электромобильного транспорта приведены на диаграмме $P(q)$ (рис.28,29). Как следует из рис.28, для обеспечения тяговых характеристик городских электромобилей общего назначения и запаса хода 300–350 км удельная энергоемкость их энергоустановок должна быть не менее 200 Вт·ч/кг, а максимальная удельная мощность не ниже 200 Вт/кг. Менее жесткие требования предъявляются к энергетическим установкам городских электромобилей, такси, электробусов и грузовых развозных электромобилей для доставки товаров на дом, поскольку для них допускается меньший запас хода и меньшие ускорения при разгоне.

На рис.28 для сопоставления приведены также требуемые удельные характеристики для подвижного состава городского и пригородного электромобильного транспорта и удельные характеристики источников энергии, которые рассматривают как возможные перспективные

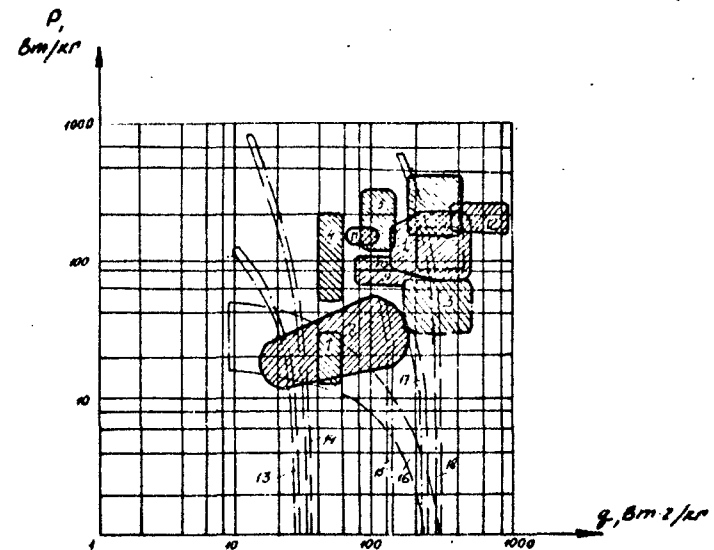


Рис.28

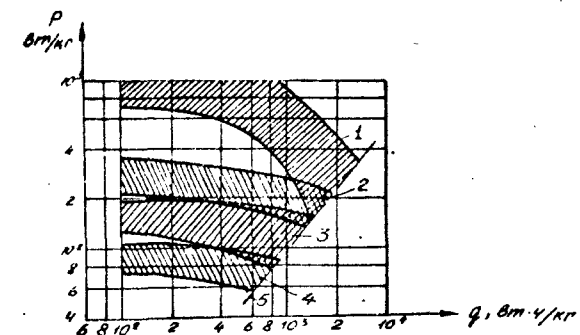


Рис.29

источники для энергоустановок транспортных средств.

По сравнению с газотурбинными и дизельными двигателями, имеющими удельные мощностные параметры соответственно 600 и 800 Вт/кг, у турбо- и дизель-генераторных агрегатов как постоянного, так и переменного тока удельные мощностные и энергетические показатели ниже. Особенно это сказывается при увеличении продолжительности дневного транспортного цикла, соответствующего 8-10 часовой заправке горючим (рис. 29), где 1 - газотурбины; 2 - дизели; 3 - турбогенераторы; 4 - дизель-генераторы; 5 - ограничение по работе с восьмичасовым запасом топлива.

Улучшение удельных показателей энергоустановок возможно в этом случае за счет уменьшения, с одной стороны, удельного расхода топлива при соответствующем режиме работы теплового двигателя, а с другой - за счет оптимизации составляющих транспортного цикла и снижения составляющих потерь элементов системы электропривода, имеющих наибольший удельный вес в зависимостях (8)-(10), которые определяют эксплуатационный КПД системы электропривода с машинными преобразователями энергии.

Исследования показали, что в отличие от грузовых самосваловых электромобилей, транспортный цикл которых построен на максимальном использовании установленной мощности, в расчетных режимах городских электромобилей имеет место изменение уровней мощностей в режиме пуска P_n электромобиля и при его движении с установившейся скоростью P_y .

Для легковых электромобилей отношение P_n / P_y составляет 2,5-3, а для городского грузового и электробусного транспорта 1,8-2. Указанное различие в требуемом уровне мощности обусловлено, очевидно, как требованиями по обеспечению достаточно высоких тягово-динамических качеств, так и эксплуатацией городских электромобилей на усовершенствованном уличном дорожном покрытии со сравнительно небольшим сопротивлением движению; различие в требуемой мощности приводит также к недоиспользованию общей установленной мощности энергоустановки.

Оценка транспортных циклов городских электромобилей показала, что соотношения между интервалами времени основных режимов движения (пуск, движение с установившейся скоростью, торможение, остановка и т.д.), для которых характерны частые вынужденные остановки в сочетании с необходимостью обеспечения требуемой динамики, делают целесообразным применение на городском электромобильном

подвижном составе комбинированных энергоустановок. При этом отаивается возможным реализовать их пусковые свойства при использовании обычных аккумуляторных систем в качестве пускового источника (при соответствующем улучшении их зарядных характеристик), а также снизить установленную мощность источника с большой емкостью для легковых электромобилей ориентировочно в 3 раза, для грузового и электробусного подвижного состава - в 2 раза.

В настоящее время возможно создание городского электробуса с малотоксичной комбинированной энергоустановкой, состоящей из дизель-генераторного агрегата и аккумуляторной батареи. Энергоустановка этого типа позволит снизить токсичность автобусного транспорта до уровня международных норм, запланированного на 1980 г.

Исследования подтвердили целесообразность и принципиальную возможность создания легкового электромобиля для городских перевозок с комбинированной энергетической установкой из пусковой аккумуляторной батареи и батареи низкотемпературных топливных элементов на жидком топливе. Пробег электромобиля может достигать 150-200 км при максимальной скорости 70 км/ч; суммарная масса энергоустановки составляет 30-32% собственной массы электромобиля, принятой в расчетах равной 1,4 т. В связи с этим представляется целесообразным сосредоточить усилия научно-исследовательских специализированных организаций на основании внедрения в промышленное производство низкотемпературных батарей топливных элементов на жидком топливе и кислороде воздуха в качестве окислителя для автономной транспортной энергетики.

При достижении необходимого уровня мощностных и энергетических показателей, а также в результате конструктивной и технико-эксплуатационной проработки станет возможным массовый перевод автотранспортных средств на энергетические установки с топливными батареями. Необходимо также отметить, что этот переход вызовет, в свою очередь, соответствующую перестройку определенных отраслей промышленности, производящих топливо, автопромышленности, электротехнической и автотранспортной промышленности.

В и в о д н. I. В связи с расширением применяемых типов источников энергии термин "электромобиль", который ранее относился только к аккумуляторному транспорту, в настоящее время распрост-

ранен практически на все дорожные безрельсовые пневмоколесные транспортные средства с электроприводом ведущих колес, питаемым от автономной энергоустановки с источниками энергии одного или двух типов.

2. Развитие и широкое внедрение городского электрического транспорта одерживается из-за отсутствия нетокочного автономного источника энергии с конкурентоспособными, по сравнению с автотранспортом, мощностными и энергетическими параметрами. Анализ режимов работы энергоустановок за транспортный цикл и эксплуатационные требования к ним показали целесообразность применения на городских электрических низкотемпературных топливных элементов, работающих на жидком топливе и воздухе в качестве окислителя, а также комбинированных энергоустановок из сочетания двух источников разной мощности и емкости.

5. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АНАЛИЗ ИХ ПРОФИЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЭМ

В главе рассмотрены системы по методике Всесоюзного научно-исследовательского аккумуляторного института на примере зарубежных исследований.

Характеристики автомобилей определяют с помощью спецификаций на соответствующие автомобили. При проведении вычислений предполагают, что автомобили имеют такой же кузов, раму и распределение веса, как и обычные автомобили. Таким образом, сделав допуск на типичную полезную нагрузку, остальной допустимый вес автомобиля (до брутто походного автомобиля) распределяют как систему энергопитания (источник энергии, контрольные приборы, редукторы и двигатель). В табл.6 представлен вес крупных узлов в дополнение к некоторым другим параметрам, необходимым для более полной характеристики механических качеств рассматриваемых автомобилей.

Данные ускорения, представленные в табл.6, соответствуют максимальным эксплуатационным характеристикам каждого автомобиля, и эти данные также служат для определения максимальной потребляемой энергии. Величины пробега - это средние величины для эквивалентных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (легковых автомобилей, такси и автобусов). Пробеги пассажирских автомобилей, транспорта общего назначения и фургонов соответствуют дневным пробегам тех автомобилей, которые не используются

непрерывно в течение длительных периодов.

Эксплуатационные профили

Для определения расходуемой энергии, которая зависит от таких факторов, как ускорение, сопротивление качению, аэродинамическое сопротивление и состояние дороги, устанавливали соответствующие приборы, записывающие скорость, ускорение и профиль наклонов для различных автомобилей при соответствующих условиях.

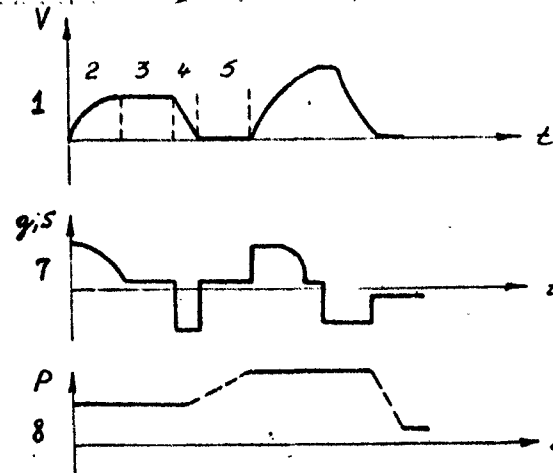


Рис.30

На рис.30 схематически представлены полученные данные. Для измерения ускорения автомобиля и движения по наклонной местности использовали акселерометр. Отдача при постоянном токе этого прибора была пропорциональна суммарному влиянию как ускорения, так и наклона. Однако возможно определить эффективный уровень, имеющий место при каждой скорости из записей ускорения, в периоды движения автомобиля с постоянной скоростью или в периоды простоя. Небольшой генератор постоянного тока подсоединяли непосредственно к кабелю спидометра и записывали скорость как функцию времени. Генератор имел постоянное магнитное поле, и его выходное напряжение было линейным и пропорциональным вращению вала якоря в минуту. Генератор приводился в действие от кабеля спидометра через Т-образную перемычку, поэтому производилась запись скорости. Для каждого автомобиля записывали условия эксплуатации в течение одного часа для получения типичной эксплуатационной картины автомобиля

Технические характеристики электромобилей

| Спецификация | : Городской : : автомобиль : автомобиль : | | : Бургон : : автомобиль : автомобиль : | | : Такси : : автомобиль : автомобиль : | |
|---------------------------------------|--|----------------------------------|---|----------------------------|--|---------------------------|
| | Нассакарский : : автомобиль : | Нассакарский : : автомобиль : | Бургон : : автомобиль : | Бургон : : автомобиль : | Такси : : автомобиль : | Такси : : автомобиль : |
| Распределение веса, кг | | | | | | |
| Брутто | 1700 | 2500 | 7000 | 4000 | 4000 | 36000 |
| Полезная нагрузка | 300 | 400 | 2500 | 500 | 500 | 10000 |
| Вес полностью снаряженного автомобиля | 1400 | 2100 | 4500 | 3500 | 3500 | 20000 |
| Кузов и рама | 900 | 1350 | 3100 | 2250 | 2250 | 15000 |
| Вес энергетической системы | 500 | 750 | 1400 | 1250 | 1250 | 5000 |
| Ускорение, км/с | 30-10 | 60-30 | 40-20 | 60-15 | 40-15 | 30-15 |
| Лобовая поверхность, м ² | 50 | 100 | 50 | 200 | 150 | 120 |
| Коэффициент лобового сопротивления | 0,25 | 0,25 | 0,85 | 0,35 | 0,35 | 0,85 |

и на силовую передачу автомобиля налагали соответствующую энергию. В табл.7 приводятся некоторые параметры автомобилей, работающих в контролируемых условиях.

Таблица 7

Некоторые параметры эксплуатации

| П у т ь | : Такси : : Манекталя : Боваргаун : | | : Бургон : : Бронкс : Сити : | |
|-----------------------------|--|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| | Бургон : : Бронкс : | Бургон : : Бронкс : | Бургон : : Бронкс : | Бургон : : Бронкс : |
| Максимальная скорость, км/ч | 72 | 72 | 48 | 33 |
| Средняя скорость, км/ч | 26 | 12,1 | 12,9 | 5,95 |
| Остановки, мин | 2,7 | 7,0 | 7,6 | 15,7 |

Вычисления и результаты

I. Аналитический метод

Вычисления для определения пиковой энергии и общих энергетических затрат, вплоть до уровней, указанных в табл.6, проводились посредством различных программ.

Последовательность вычислений показана на рис.31.

Программа по вычислению крутящего момента. Записанную скорость и профиль наклона для каждого автомобиля преобразовывали в профиль энергии ведущей оси, подставляя вычисленные характеристики автомобилей из табл.6 в соответствующие математические уравнения, относящие налагаемую энергию, вес автомобиля, скорость и аэродинамические факторы. Записанную скорость и вычисленные профили ведущей оси затем используют для получения кривых зависимости крутящего момента от скорости, что необходимо для вычисления размера и веса мотора, преобразователя мощности и редуктора.

Программа по вычислению эффективности. После выбора компонентов привода передачи на основе вышеприведенных результатов данные соответствующего общего КПД передачи в зависимости от налагаемой энергетической нагрузки использовали для вычисления профиля ведущей оси. Это дает зависимость "энергия - время". Кроме вычисления среднего КПД трансмиссии для определенного пробега, по этой программе вычисляли также другие данные, такие как средняя скорость автомобиля, частота остановок, а также потребность в пиковой и средней энергии, поэтому суммировали основные различия между автомобилями и режимами их работы.

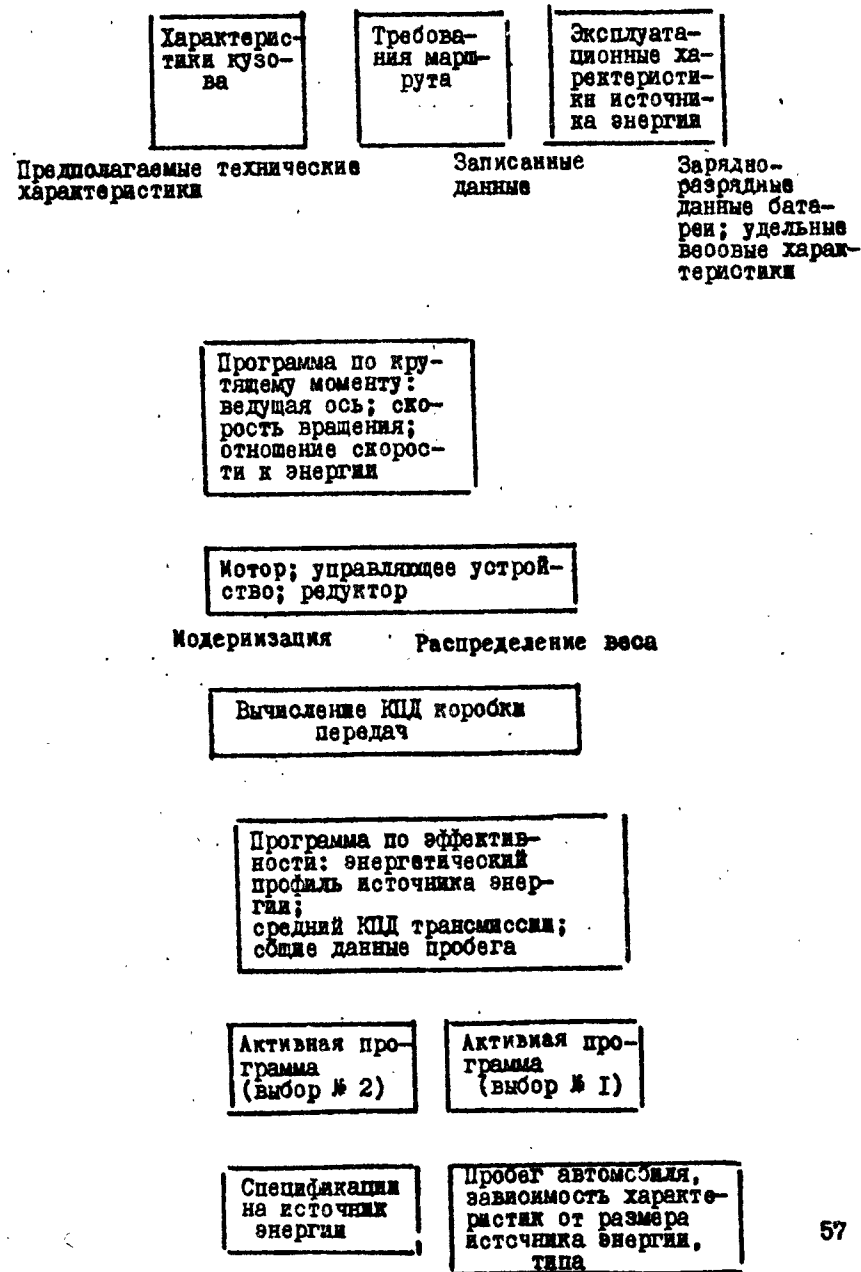
Активная программа. Выбор №1. Посредством этой программы можно объединить вычисленные профили энергии, указанные выше, и уравнения для разрядных характеристик, связывающие выходное напряжение, ток и состояние заряженности, чтобы вычислить возможные радиусы действия автомобиля для определенных систем батарей. При проведении данной программы состояние заряженности батарей, а также режим разряда вычисляли в течение каждой секунды в период определения профиля энергии.

Метод повторного вычисления использовали для повторного вычисления профиля эксплуатации, сохраняя интегральный сточек времени, расстояния, количества остановок, а также состояние заряженности батареи. Этот процесс продолжали до тех пор, пока батарея была разряжена, либо до заранее установленной величины, либо до точки, когда она уже не могла удовлетворять энергетические затраты автомобиля. Второй этап программы - использование петли компьютера, что позволяет ввести последовательные этапы постоянной мощности порядка 1 кВт, полученной от генератора, работающего параллельно с батареей. При данном методе весовой допуск источника энергии сохраняли постоянным, уменьшая вес батареи для компенсации дополнительного веса генератора, входящего в гибридную систему. В периоды низкого расхода энергии избыточная энергия генератора может быть использована для подзарядки батареи в пределах, соответствующих заряду батареи. Таким образом, регулируя заряд батареи и модернизируя эксплуатационные характеристики, посредством цифровых методов этой программы возможно определить эффективный радиус действия как функцию генератора. На рис.32 показаны результаты, полученные для различных типов автомобилей, в которых используется гибридный источник энергии - генератор (овинцовая батарея).

В выборе № 2 разработана активная программа для вычисления спецификаций источника энергии, исходя из удельной энергии и мощности; при этом объединяли характеристики автомобиля и соответствующие требования по их эксплуатации. В этой подпрограмме энергетический профиль источника энергии интегрировали для вычисления общей энергии и пиковую энергию определяли как максимальную выходную энергию источника энергии.

Требования, предъявляемые к ведущей оси автомобиля. Величины ведущей оси вычисляли из величин общей силы, действующей на автомобиль и противодей-

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ



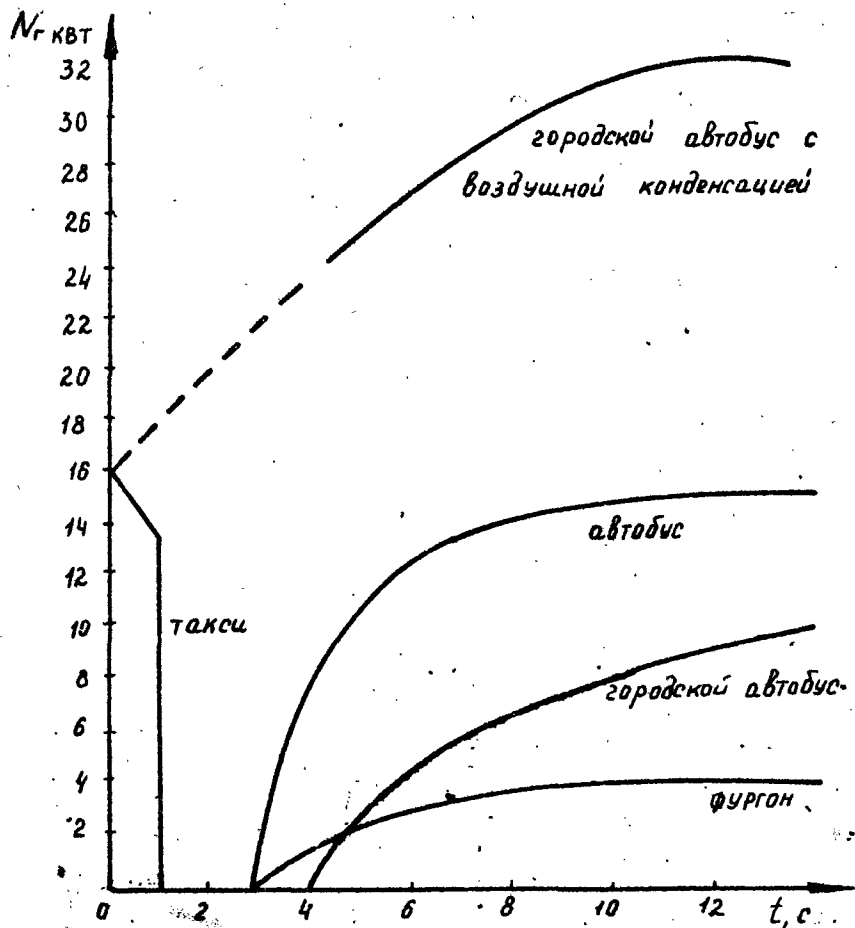


Рис. 32

вущей движению. Для колесных автомобилей это прежде всего силы, возникающие в результате сопротивления качению, аэродинамического торможения, ускорения и гравитационного притяжения. Следующие уравнения показывают зависимость между мгновенной силой ведущей оси (замедляющая сила, умноженная на скорость автомобиля), характеристиками автомобиля и мгновенной скоростью для каждого вышеуказанного сопротивления.

$$P_{\text{кв}} = \frac{F_r \cdot D}{t} = F_r \cdot V;$$

$$F_r = F(\text{качения}) + F(\text{аэродинамич.}) + F(\text{ускорения}) + F(\text{подъема}).$$

$$F(\text{качения}) = K_1 (W_0) [a \cdot BV^2].$$

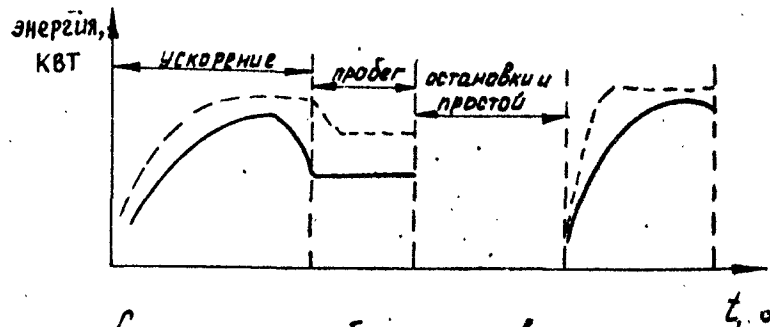
$$F(\text{аэродинамич.}) = K_2 \cdot C \cdot A \cdot V^2.$$

$$F(\text{ускорения}) = K_3 (W_y) (V) \left(\frac{dV}{dt}\right).$$

$$F(\text{подъем}) = K_4 (W_y) \sin \alpha.$$

В данных уравнениях W_y - брутто автомобиля, кг; V - мгновенная скорость, км/ч; C - коэффициент торможения для данного автомобиля; A - фронтальная площадь поверхности автомобиля, m^2 ; α - наклон, градусы; F_i - мгновенная сила, необходимая для преодоления сопротивления γ .

На рис. 33 показана типичная зависимость "энергия - время",



Схематическое изображение зависимости энергия - время:

- энергия, источника энергии;
- энергия, вырабатываемая осью.

Рис. 33

соответствующая схематической кривой "скорость - время", пока-

занной на ршо.30:

Обычно максимальный крутящий момент наблюдается в начальной фазе ускорения и быстро падает при увеличении скорости. Соответствующим образом прилагаемая энергия быстро растет и достигает максимальной величины в течение нескольких секунд после начала движения автомобиля. Эта потребность в энергии сохраняется или может падать до более низкой стабильной величины, по мере того как автомобиль достигает постоянной скорости, зависящей от ускорения. Очевидно, что когда автомобиль движется накатом или отойт, энергия, прилагаемая к оси, и крутящий момент равны нулю. Для каждой комбинации "автомобиль - маршрут" учитывается весь профиль, и максимальный момент, который удовлетворял бы основным требованиям определенного автомобиля, выбирается в соответствии с размером элементов силовой передачи.

Компоненты силовой передачи. Кроме выбора вращающего момента и напряжения, для автомобилей определенного назначения осуществляется выбор привода от двигателя с соответствующей зубчатой передачей и электронным контролем, для чего требуется тщательный анализ многих факторов, таких как тепловые режимы, способы охлаждения, а также механические пределы этих компонентов. Проблемы, связанные с размером этих компонентов, очень сложны, так как требуемые профили загрузки отклоняются от постоянной величины из-за трудности точного вычисления тепловых факторов электронных устройств. Однако для данного исследования требуется только приблизительное вычисление веса, а точная спецификация этих компонентов не требуется. Для этой цели удобно определить зависимость "скорость-энергия". Эта величина указывает размер мотора и управляющего устройства. Этот параметр, наряду с опубликованными данными, использовали для вычисления веса и КПД этих компонентов. Произведение отношения скоростей определяется как максимальная энергия, умноженная на отношение максимальной скорости автомобиля к скорости автомобиля при максимальной энергии. Величины этого параметра определяли посредством анализа вращающего момента. В табл.8 показано нарушение веса, вызванное элементами оиловой передачи, исходя из отношения "скорость-энергия" для каждого автомобиля. В табл.8. включен также средний КПД трансмиссии каждого автомобиля во время его пробега, накопленная энергия, а также требуемая максимальная энергия. КПД преобразователей энергии и электрических моторов зависит от

Таблица 8

Вычисление характеристик оиловой передачи

| Параметры силовой передачи | : Городской :Пассажирский : :автомобиль :автомобиль : | | : Дачковой :Такси : :автомобиль :автомобиль : | |
|---|--|-----|--|------|
| | 500 | 750 | 1400 | 1250 |
| Масса, кг | 500 | 750 | 1400 | 1250 |
| Общее распределение (табл.6) | 500 | 750 | 1400 | 1250 |
| Моторы (контрольные приборы), механизмы | 100 | 120 | 260 | 225 |
| Источник энергии | 400 | 630 | 1140 | 900 |
| Максимальная энергия ведущей оси, кВт | 15 | 25 | 50 | 70 |
| Средний КПД трансмиссии, % | 12 | 77 | 79 | 82 |
| Максимальная выходная мощность источника энергии, кВт | 21 | 33 | 63 | 85 |
| Требуемая накопленная энергия, кВт/ч | 12 | 26 | 60 | 125 |
| | | | | 100 |
| | | | | 355 |

частоты или скорости лишь незначительно, но обычно зависит от выходной мощности, выраженной как часть отношения "скорость-энергия". При полной энергии, которая не зависит от скорости, максимальный КПД трансмиссии соответствует потерям механической энергии при уменьшении скорости и составляет 92% от максимального результирующего КПД трансмиссии. Так как КПД моторов и контрольных приборов падают до нуля при низких уровнях энергии, указанные в табл.8 КПД трансмиссии являются цифровым выражением средней выходной мощности по отношению к полной мощности силовой передачи.

Т р е б о в а н и я к источнику энергии. Характеристики батарей, вычисленные на основании параметров, приведенных в табл.8, представлены в табл.9. Из указанных данных можно сделать следующие выводы:

1. Существующие свинцовые батареи (22-33 кВтч/кг) не соответствуют условиям эксплуатации рассматриваемых автомобилей.

2. Батареи, удельная энергия которых равна приблизительно 66 Втч/кг, пригодны для использования в небольших электромобилях.

3. Батареи с удельной мощностью порядка 220 Вт/кг и удельной энергией более 220 Втч/кг должны использоваться вместе с двигателями внутреннего сгорания.

Таблица 9

Характеристики, требуемые для батарей электромобилей

| Транспорт | Удельная энергия, Втч/кг | Удельная мощность, Вт/кг |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Городской автомобиль | 30 | 53 |
| Пассажирский автомобиль | 41 | 53 |
| Фургон | 53 | 55 |
| Легковой автомобиль | 110 | 95 |
| Такси | 98 | 52 |
| Автобус | 81 | 36 |

В ы б о р батарей и их о ш о т е м. Кроме рассмотренной удельной энергии различных потенциальных систем батарей, следует учитывать доступность, а также стоимость материалов и технические возможности разработки батарей. При изучении периодической системы Менделеева, а также таблиц распространения элементов ста-

новятся очевидным, что количество потенциальных реагентов ограничивается элементами, перечисленными в табл.10. В табл.10 указывается также стоимость этих элементов и их запас.

Под запасом подразумевается приблизительное количество лет, в течение которых могут расходоваться указанные элементы в США, если их производство будет идти на прежнем уровне. Для тех материалов, которые предполагается использовать в электромобилях, указывается стоимость не только за кг, но также, что более важно, за единицу электричества(кА.ч); эта стоимость входит в общую стоимость батареи. Из табл.10 видно, что наиболее пригодными материалами для анодов являются натрий и цинк, а в качестве катодов - хлор и сера.

Таблица 10

Стоимость и запас элементов, потенциально пригодных для использования в батареях

| Э л е м е н т ы | Руб/кг | Руб/кА.ч | Запас, годы |
|--------------------|--------|----------|------------------|
| А н о д ы | | | |
| | 1,45 | 1,23 | 15-40 |
| | 1,5 | 0,40 | 40 |
| | 39,5 | 18,28 | 40 |
| | 1,8 | 0,34 | 100 |
| | 1,8 | 4,66 | 100 |
| К а т о д ы | | | |
| | 14,2 | 6,87 | 5 |
| | 0,34 | 0,05 | 100 |
| | 2,7 | 1,77 | 100 |
| | 0,41 | 0,07 | 50 ^{x)} |

x) Запас серы быстро меняется, так как возрастает восстановление серы из топлива для предотвращения загрязнения воздуха.

На рис.34 показана удельная весовая энергия для различных систем батарей, которые в перспективе предполагается использовать в качестве первичных источников энергии в электромобилях. Указанные параметры - это либо уже полученные величины, либо считающиеся возможными. Проводится сравнение этих величин с удельной весовой энергией, основанной только на весе активных материалов. Для сравнения в табл.10 указывается также характеристики никель-кадмиевых и водородно-кислородных топливных элементов. В послед-

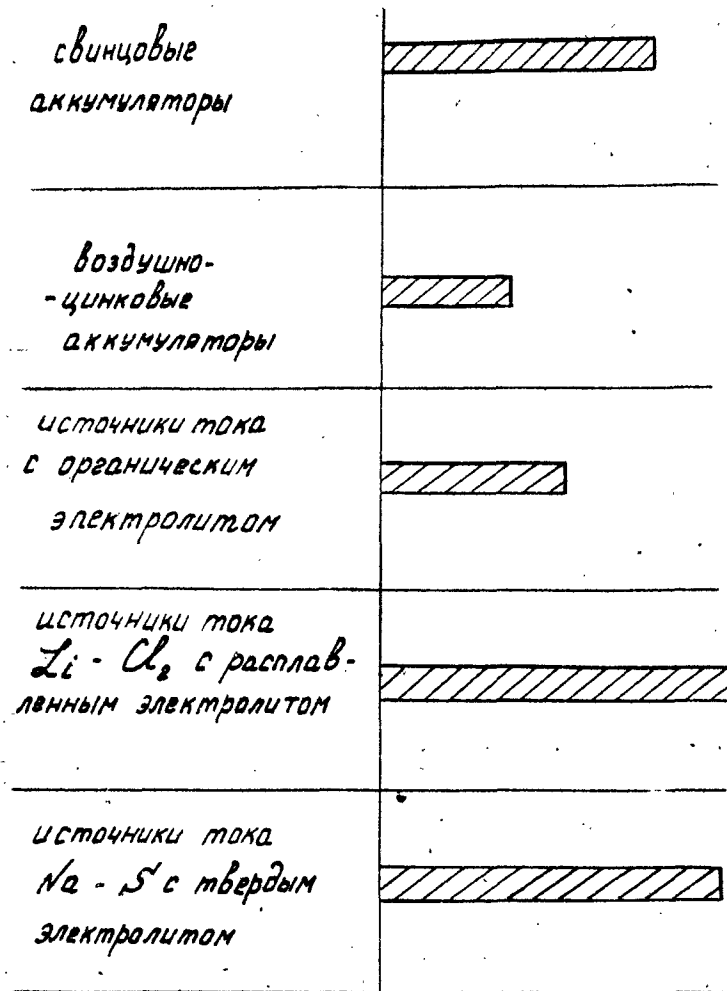


Рис. 34

нем случае для системы непрерывного питания расчет стоимости проводили на основании получаемой энергии.

С в и н ц о в ы е батареи. Свинцовые батареи — наиболее старые из аккумуляторных батарей. Они используются уже в течение 100 лет и представляют наибольший интерес с экономической точки зрения,

Свинцовые ак-

кумуляторы применяются главным образом для запуска, освещения и зажигания транспорта, оснащенного двигателями внутреннего сгорания, но значительная часть их используется в качестве источников энергии в промышленных карах, картингах и шахтных локомотивах. Основные преимущества свинцовых батарей: высокая надежность (срок службы от 4 до 6 лет в условиях непрерывного дневного цикла при полном заряде и разряде) и низкая стоимость. Эти качества делают свинцовую батарею наиболее пригодной для электрической тяги, а низкая удельная энергия не позволяет рассматривать ее как первичный источник энергии для электромобилей.

Исключение составляют городские автомобили и фургоны. Если этот транспорт использовать с минимальным дневным пробегом, он может соответствовать верхнему пределу удельной энергии свинцовой батареи.

При возможном усовершенствовании свинцово-кислотной системы можно добиться увеличения удельной энергии. Действительно, уже получено значительное увеличение этих параметров (порядка 30%) за последние 15–20 лет. Предполагается продолжать это направление и получить в течение последующих лет предельную удельную энергию порядка 55 Вт·ч/кг. Это приведет к увеличению количества небольших электромобилей с ограниченной сферой использования и фургонов, которые в настоящее время составляют значительную часть от общего числа электромобилей.

Несмотря на то, что цинк-воздушные системы имеют очень высокую предельную удельную энергию, получение этой энергии ограничивается проблемами роста дендритов и влияния карбонатов (рис. 34).

Практически может быть получено только 30–40 Вт·ч/кг, 66–88 Вт·ч/кг для систем с электрическим подзарядом. Никель-кадмиевая система имеет сравнительно высокую стоимость. Хотя предельная удельная энергия никель-цинковой системы лишь незначительно выше, чем у свинцовых батарей, очевидно, что эта система имеет определенную перспективу, хотя стоимость и проблемы, связанные с Zn — электродом, значительно отделяют ее от использования в электромобиле.

Водородно-кислородные топливные элементы представляют интерес с точки зрения их удельной энергии, но они выдвигают сложные проблемы использования газа и электролита, необходимо также использование сложных электрических схем для соединения их со вспомога-

тельными батареями для обеспечения необходимой пиковой мощности, требующейся при использовании их в электромобилях.

Батареи с органическим электролитом также представляют потенциальный интерес, так как неводные электролиты позволяют использовать такие дешевые высокоактивные пары, как натрий и бром. Однако практически еще не созданы системы, использующие эти два материала. Кроме того, недавно разработанные подзаряжаемые системы с органическим электролитом имеют такой недостаток, как низкая электропроводность электролита, что ограничивает режимы заряда и разряда до чрезвычайно низких величин и приводит к низкой общей зарядно-разрядной эффективности при использовании аккумуляторных батарей.

Наиболее перспективными с точки зрения создания систем с высокой удельной энергией и высоким КПД в настоящее время являются системы либо с твердыми электролитами, либо с расплавами солей, работающими при высоких температурах. В обоих этих направлениях проводится интенсивная работа. Батареи "литий-хлор" с использованием в качестве электролита расплава хлорида работают при очень высоких температурах (порядка 500°C) для поддержания осеи электролита в расплавленном виде. Однако эта система обладает возможностью использования очень высоких режимов заряда и разряда благодаря высокой электропроводности расплава, который находится в пористом керамическом диске. Менее дорогой анодный материал используется в батарее "натрий-сера" с глиноземом в качестве электролита. Хотя система "натрий-сера" работает при высоких температурах (приблизительно 300°C), в данном случае нет проблем, связанных с коррозией, как это имеет место в системах с использованием солевых расплавов. Однако система "натрий-сера" выдвигает такие уникальные проблемы, как стабильность керамического электролита при непрерывном электрическом циклировании, изготовление герметизирующих уплотнений между керамическим электролитом и металлической или стеклянной оболочкой элемента, создание соответствующих методов обработки керамики для получения однородного высококачественного твердого электролита и разработка надежного и безопасного способа заполнения элемента, а также методов активации - все это необходимо для создания безопасной и надежной конструкции, работающей при высокой температуре.

Основные преимущества батарей "натрий-сера":

высокая в.д.о. и эксплуатационное напряжение 1,7-2,1 В;

высокая весовая удельная энергия - 220-308 Втч/кг;
высокая объемная удельная энергия - 178-250 кВтч/м³;
высокая удельная энергия или режим разряда (1-3-часовой);
герметичная конструкция;
отсутствие газовой выделений;
нулевой саморазряд;
высокая эффективность повторных зарядов - 85% при 8-часовом режиме;

жидкие реагенты - отсутствует старение активных материалов;
плоское плато разрядного напряжения 0-60% глубины теоретического разряда;

в.д.о. обеспечивает заряд порядка 60-100% глубины разряда.

Для батарей "натрий-сера" в настоящее время наблюдаются следующие ограничения:

высокая температура; при 300°C требуется тепловая изоляция при работе без нагрузки, а также охлаждение для поддержания этой температуры при заряде или разряде в процессе эксплуатации;
возможное старение твердого электролита, что приводит к механическим повреждениям, а также ухудшению электрических характеристик при циклировании;

высокая реакционная способность реагентов, что вызывает коррозию; требуется обеспечение безопасности;

не выдерживает перезаряд, необходим тщательный контроль заряда и напряжения для ограничения режима заряда и количества заряда.

ВЫВОДЫ

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы относительно пригодности батарей для использования в электромобилях:

1. Из-за низкой удельной энергии имеющейся в настоящее время свинцовые батареи могут использоваться только в электромобилях общего назначения и небольших фургонах в тех случаях, когда этот транспорт используется на целый день. Свинцово-кислотные батареи - наиболее подходящая система, и полагают, что при проведении дальнейших усовершенствований возможно получить удельную энергию порядка 55 Втч/кг. Такие батареи можно будет использовать в различных транспортных средствах и городских автомобилях, в которых используются в настоящее время двигатели внутреннего сгорания.

2. В больших автомобилях с высокими характеристиками и дли-

тельными пробегом могут использоваться только высокотемпературные батареи со щелочными металлами, имеющие удельную энергию порядка 220 Вт·ч/кг. Такие системы еще только начинают разрабатываться. Батареи "натрий-сера" с твердым электролитом, очевидно, будут использоваться наиболее широко.

3. В будущем желательно иметь батареи с высокой удельной энергией, работающую при окружающей температуре. Так как для получения высокой удельной энергии требуются электрохимические пары, характеризующиеся высокой активностью, то полагают, что эта задача может быть решена посредством разработки и использования новых твердых электролитов, работающих при низкой температуре и имеющих высокую электропроводность, которые будут служить барьером между этими реагентами.

6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СВЕРТЫВАНИЯ ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ПРИ СОЗДАНИИ НОВОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Создание, расчет, конструирование и эксплуатация целого ряда механизмов и машин требуют знания не только теории электрических и магнитных цепей, но и теории электрических и магнитных полей, а также других полей, например, теплового, газового, гидравлического и т.п. К таким механизмам и машинам относятся многие из современных машин и механизмов.

Появление большого количества закономерностей и эффектов природы вызывает необходимость их свертывания.

В Московском автомобильно-дорожном институте на кафедре электротехники и электрооборудования разработан метод свертывания законов динамики, позволяющий создать принципиально новые машины - преобразователи различных видов энергии, совершенствовать существующие машины и механизмы, прогнозировать открытия закономерностей и эффектов.

Сущность метода заключается в том, что если известны величины основных параметров и направление распространения любых двух взаимодействующих полей, то всегда можно определить направление и величину параметра третьего поля, которое при этом возникает.

Базируется метод на знании комплекса как классических, так и новейших закономерностей и эффектов; учитывается также всеобщий закон обратимости.

В табл. II приведены все известные закономерности и эффекты,

относящиеся к динамическим процессам природы.

Список закономерностей и эффектов не ограничивается указанными в табл. II.

На основе табл. II составлены табл. I2 и I3, в которых в качестве начальных условий приняты взаимодействия новых полей и течений.

Таблица II

| № : Наименование первой : пп : закономерности | Начальные условия | | | | Результаты | | |
|--|--|--|--|--|--|--|---|
| | Поле : Тече- : : I : ние : : : I : | Поле : Тече- : : II : ние : : : II : | Поле : Тече- : : III : ние : : : III : | Поле : Тече- : : IV : ние : : : IV : | Поле : Тече- : : V : ние : : : V : | Поле : Тече- : : VI : ние : : : VI : | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1. Закон Ампера | ПММ | ТММ | ПЭЭ | ТЭЭ | ПМО | ТМО | |
| 2. Закон электромагнитной индукции при однородном магнитном поле | ПММ | ТММ | ПМО | ТМО | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 3. Закон электромагнитной индукции при неоднородном магнитном поле | ПММ | ТММ | ПМО | ТМО | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 4. Закон электромагнитной индукции при изменяющемся магнитном поле | ПММ | ТММ | ПМО | ТМО | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 5. Эффект Холла | ПММ | ТММ | ПЭЭ | ТЭЭ | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 6. Эффект Нерста | ПММ | ТММ | ПТТ | ТТТ | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 7. Акустомагнито-электрический эффект | ПММ | ТММ | ПЭЭ | ТЭЭ | ПЭЭ | ТЭЭ | |
| 8. Эффект Барнета | ПМО | ТМО | ПЭЭ | ТЭЭ | ПММ | ТММ | |

ПРИМЕЧАНИЕ. ПММ - поле постоянного магнита или постоянного электромагнита; ПЭЭ - поле постоянное электрическое; ПМО - поле постоянной механической напряженности; ПИЭ - поле изменяющееся или переменное электрическое; ПИМ - поле изменяющееся магнитное или поле переменного магнита; ПТТ - поле постоянное тепловое; ПИЗ - поле переменное звуковое; ТММ - магнитный поток постоянного магнита или постоянного электромагнита; ТИЭ - постоянный электрический ток; ТМО - механическое перемещение постоянное; ТИЭ - переменный (изменяющийся) электрический ток; ТММ - магнитный поток изменяющийся; ТТТ - постоянный тепловой поток; ТИЗ - течение звука.

Порядковый номер основных закономерностей в табл. II соответствует тому же порядковому номеру соответствующих обратных закономер-

ностей в табл. I2 и I3. Незаполненные строки графы 2 табл. I2 и I3 - это новые закономерности, которые неизвестны по каким-либо объективным причинам.

Таблицы используются следующим образом. При необходимости, например, создания нового генератора электрического тока из табл. II выделяют законы, в которых участвует электрическое поле. Их может быть несколько. Из них выбирают наиболее приемлемые для данных условий. На основе выбранной закономерности строят модель нового электрического генератора.

Таблица I2

| № : пп : | Наименование второй закономерности : | Начальные условия : | | | | Результат : | |
|-------------|---|---------------------|------|--------------|------|-------------|-------|
| | | Поле : Тече- | | Поле : Тече- | | Поле : | Тече- |
| | | I : | II : | III : | IV : | | |
| I : | 2 : | 3 : | 4 : | 5 : | 6 : | 7 : | 8 : |
| 1. | Закон электромагнитной индукции при однородном магнитном поле | ПММ | ТММ | ПМО | ТМО | ППЭ | ТПЭ |
| 2. | Закон Ампера | ПММ | ТММ | ППЭ | ТПЭ | ПМО | ТМО |
| 3. | Закон электромагнитной индукции при неоднородном магнитном поле | ПММ | ТММ | ПИЭ | ТИЭ | ПМО | ТМО |
| 4. | Закон электромагнитной индукции при изменяющемся магнитном поле | ПММ | ТММ | ПИЭ | ТИЭ | ПМО | ТМО |
| 5. | Эффект Холла | ПММ | ТММ | ППЭ | ТПЭ | ППЭ | ТПЭ |
| 6. | Закон Джоуля-Ленца | ПММ | ТММ | ППЭ | ТПЭ | ППТ | ТПТ |
| 7. | " | ПММ | ТММ | ПИЭ | ТИЭ | ПИЗ | ТИЗ |
| 8. | Униполярная машина Фарадея, 1932 г. | ПМО | ТМО | ПММ | ТММ | ППЭ | ТПЭ |

Такой метод позволяет:

- осуществлять дальний и ближний прогноз возможных закономерностей и эффектов;
- облегчить изучение физических явлений, происходящих в природе, и упростить фиксацию открытых закономерностей и эффектов;
- классифицировать физические явления по роду взаимодействия полей и течений;

Таблица I3

| № : пп : | Наименование третьей закономерности : | Начальные условия : | | | | | | Результат : | |
|-------------|--|---------------------|------|--------------|------|--------------|------|-------------|-------|
| | | Поле : Тече- | | Поле : Тече- | | Поле : Тече- | | Поле : | Тече- |
| | | I : | II : | III : | IV : | V : | VI : | | |
| I : | 2 : | 3 : | 4 : | 5 : | 6 : | 7 : | 8 : | | |
| 1 | Эффект Барнета | ППЭ | ТПЭ | ПМО | ТМО | ПММ | ТММ | | |
| 2 | Эффект Барнета | ПМО | ТМО | ППЭ | ТПЭ | ППЭ | ТММ | | |
| 3 | | ПМО | ТМО | ПИЭ | ТИЭ | ПММ | ТММ | | |
| 4 | | ПМО | ТМО | ПИЭ | ТИЭ | ПММ | ТММ | | |
| 5 | | ППЭ | ТПЭ | ППЭ | ТПЭ | ПММ | ТММ | | |
| 6 | | ППТ | ТПТ | ППЭ | ТМО | ПММ | ТММ | | |
| 7 | | ПИЗ | ТИЗ | ПИЭ | ТИЭ | ПММ | ТММ | | |
| 8 | Закон Ампера | ППЭ | ТПЭ | ПММ | ТММ | ПМО | ТМО | | |

- открыть новые принципы подхода к изучению известных закономерностей и принципы подхода к открытию еще неизвестных закономерностей природы;
 - определять направление, силу и области действия радиационных, электронных, плазменных, инфракрасных, пыльных, акустических и других излучений, получать магнитные поля новыми способами, создавать новые машины и аппараты для любых отраслей промышленности.
- Метод свертывания законов динамики был использован в МАДИ при уточнении методики расчета униполярных электромагнитных тяговых муфт, для создания новых тяговых двигателей, принципиально отличающихся от классических машин.

Л и т е р а т у р а

1. Галкин В.М. Электрические аккумуляторные автомобили / Наркомхоз РСФСР. - М., 1938.
2. Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Гудо-Малков Б.П. Состояние и перспективы развития пассажирского и грузового электроавтомобильного транспорта. - Электричество, 1975, № I.
3. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / Ефремов И.С., Пролыгин А.П., Андреев В.М., Миндлин А.Б. - М., Энергия, 1976.
4. Бусыгин Б.П. Применение метода свертывания законов динамики при создании новой техники. - Межотраслевые вопросы науки и техники / ГОСИНТИ, 1976, вып.3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| 1. Расчет однотипных энергетических установок | 3 |
| 1. Сопротивление движению и потребление энергии | 3 |
| 2. Выбор аккумуляторной батареи | 7 |
| 2. Расчет систем с топливными элементами | 20 |
| 3. Методика расчета системы с высокоёмкими аккумуляторами .. | 30 |
| 4. Методика расчета системы привода автомобиля с однотипными и комбинированными энергосиловыми установками | 41 |
| 5. Оценка характеристик автомобилей и анализ их профилей с применением ЭВМ | 52 |
| 6. Применение метода свертывания законов электродинамики при создании новой техники для автомобилей | 68 |
| Литература | 71 |

Борис Павлович БУСЫГИН

ЭЛЕКТРОМОБИЛИ
Учебное пособие

Редактор Е.А.Вершинская

Подписано в печать Л - 74174 от 26.XII.79г.
Формат 60x90/16 Уч.-изд.л. 3,27 Усл.печ.л.4,5
Тираж 298 заказ з.80 цена 16 коп.

Ротапринт МАДИ, Ленинградский пр., 64

№ 2