

## Лекция 4

1. Характеристики тяговых аккумуляторных батарей.
2. Характеристики топливных элементов.
3. Характеристики комбинированных энергоустановок.

1

К электрохимическим аккумуляторным батареям, используемым на транспортных средствах, предъявляют следующие требования:

- высокая удельная энергоёмкость;
- минимальный саморазряд;
- высокий КПД при заряде и разряде;
- малое внутреннее сопротивление;
- широкий диапазон рабочих температур;
- минимум токсичных газовыделений;
- взрыво- и пожаробезопасность в эксплуатации;
- простота в обслуживании;
- механическая прочность, и надёжность,
- длительный срок службы и хранения;
- минимальные массогабаритные и стоимостные показатели и др.

Тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ) – весьма сложная электрохимическая система с непрерывно меняющимися параметрами. За период разряда аккумуляторов в них происходит распад исходных и образование новых химических соединений, перераспределение плотностей электролита, газовыделение и т.д. Поэтому параметры ТАБ могут изменяться в функции времени, режима разряда, температуры и пр.

В условиях эксплуатации ТАБ работают в неустойчивых прерывистых режимах разряда (а при наличии рекуперативного торможения – и кратковременных подзарядов) с изменяющимся значением разрядного (зарядного) тока. В связи с этим аналитические выражения, связывающие параметры ТАБ (ток, время разряда, ёмкость, напряжение батареи и др.), найти весьма сложно, их можно получить только для конкретных типов аккумуляторов и определенных режимов и условий их работы в неудобной для практического применения форме. Поэтому для ТАБ целесообразно пользоваться схемой замещения и графическими зависимостями.

Наиболее общей является схема замещения ТАБ, показанная на рис. 4.1, а, где  $E_{ТАБ}$  – ЭДС ТАБ, изменяющаяся в функции степени разряженности  $Q_p$  аккумуляторов;  $R_0$  – активное сопротивление ТАБ, зависящее от степени разряженности аккумуляторов и температуры  $t$  электролита,  $L_{ТАБ}$  – собственная индуктивность ТАБ, имеющая тенденцию к снижению при высокочастотных импульсных режимах разряда вследствие поверхностного

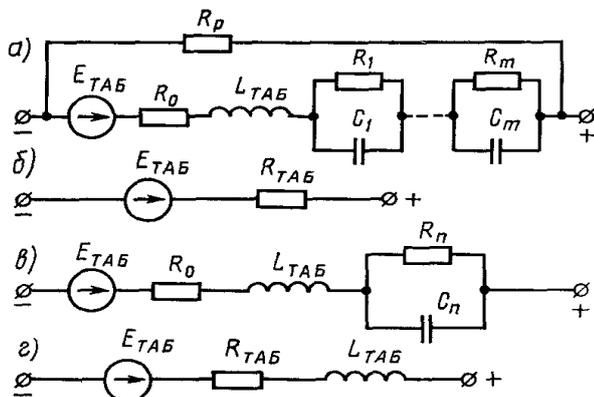


Рис. 4.1

эффекта;  $R_1C_1, \dots, R_mC_m$  – цепи, характеризующие ЭДС поляризации аккумуляторов и ее изменение (значение ЭДС зависит от степени разряженности ТАБ и температуры электролита, а характер и скорость ее изменения – от тока  $i_{ТАБ}$ );  $R_p$  – сопротивление, характеризующее процесс саморазряда аккумуляторов и зависящее от времени разряда, температуры электролита и срока службы аккумуляторов. Пользоваться такой схемой весьма трудно, но на ее основании можно определить расчетную схему замещения батареи для каждого характерного режима разряда.

Электродвижущая сила ТАБ большинства известных электрохимических аккумуляторов не зависит от температуры электролита и окружающей среды и за время полного разряда батареи снижается на 10...15 % от начальной

величины.

Значением  $R_0$  в ряде случаев можно пренебречь ввиду его малости ( $0,7 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$  Ом на элемент). Однако, если сопротивление нагрузки соизмеримо или меньше  $R_0$ , этот параметр необходимо учитывать, так как он в большой мере обуславливает КПД разряда и заряда аккумуляторов. Для всех типов ТАБ сопротивление  $R_0$  увеличивается с возрастанием степени разряженности батареи и снижением температуры электролита.

В импульсном режиме ТАБ пульсация ее выходного напряжения определяет полное внутреннее сопротивление, модуль которого

$$Z_{ТАБ} = \sqrt{R_{ТАБ}^2 + (x_{LТАБ} - x_{CТАБ})^2},$$

где  $R_{ТАБ}$ ,  $x_{LТАБ}$  и  $x_{CТАБ}$  – активное, индуктивное и емкостное сопротивления ТАБ.

Индуктивное сопротивление обусловлено геометрией ТАБ и пространственной ориентацией

токопроводящих элементов, образующих контуры с индуктивностью 0,2...1 мкГн на один элемент. Емкостное сопротивление определяется процессами поляризации электролита. Падение напряжения на сопротивлении

$R_{II} = \sum_1^m R_i$  называется ЭДС поляризации, составляющей 3...10 % от  $E_{ТАБ}$ . Время полного установления ЭДС

поляризации достигает нескольких десятков секунд. Однако практически при токах ТАБ свыше 200 А уже через 1 с отклонение ЭДС поляризации от установившегося значения не превышает 3...5 %.

Следует учитывать явление непрерывного саморазряда ТАБ, происходящего вследствие выделения кислорода на положительном электроде и из за конечного значения сопротивления изоляции. За первые сутки хранения в заряженном состоянии при температуре окружающей среды 20 °С за счет саморазряда запасенная энергия ТАБ уменьшается приблизительно на 5 %. При дальнейшем хранении скорость саморазряда падает

Для ТАБ наиболее важными являются внешние характеристики  $U_{ТАБ}(I_{ТАБ})$  при различных значениях степени заряженности  $Q$  (рис.4.2). Эти характеристики конкретного типа ТАБ не зависят от режима разряда. Энергия, отдаваемая ТАБ, напротив, обусловлена режимами разряда.

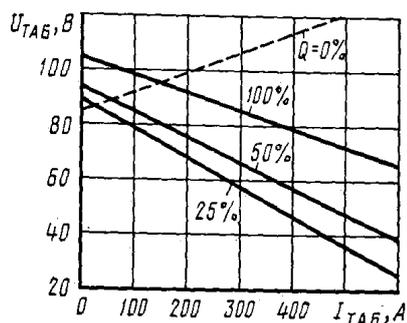


Рис. 4.2

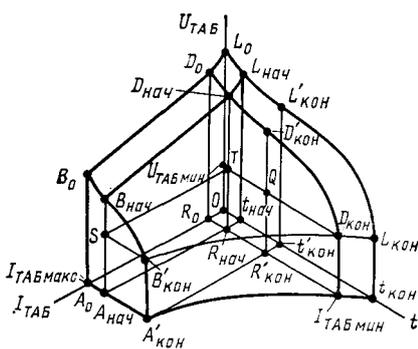


Рис. 4.3

Она в общем случае определяется согласно

$$A_{ТАБ} = \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} U_{ТАБ}(t) i_{ТАБ}(t) dt, \text{ а при}$$

$$I_{ТАБ} = const -$$

$$A_{ТАБ} = I_{ТАБ} \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} U_{ТАБ}(t) dt$$

Отношение полезной энергии  $A_{ТАБ пол}$ , отданной батареей за время ее полного разряда, к начальному запасу

энергии  $A_{ТАБ нач}$  есть КПД разряда ТАБ:

$$\eta_{ТАБ p} = A_{ТАБ пол} / A_{ТАБ нач} = 1 - \Delta A_{ТАБ} / A_{ТАБ нач},$$

где  $\Delta A_{ТАБ}$  – потери энергии на внутреннем сопротивлении батареи.

Поскольку при любом разрядном токе степень заряженности аккумуляторной батареи с течением времени падает, то внешние характеристики ТАБ целесообразно давать в пространственной системе координат (см. рис. 4.3).

Полезная мощность батареи  $P_{ТАБ}$  является функцией разрядного тока и формы его кривой, степени разряженности, температуры электролита и определяется выражением

$$P_{ТАБ} = E_{ТАБ} i_{ТАБ} - R_{ТАБ} i_{ТАБ}^2. \quad (4.1)$$

На рис. 4.4 представлены зависимости  $P_{ТАБ}(I_{ТАБ})$  при различной степени заряженности для ТАБ типа 72ЭЖНТ-160У2. Дифференцируя (1.1) и приравнявая результат нулю, получим предельный максимальный пусковой ток,

соответствующий наибольшей мощности  $P_{ТАБ}$

$$I_{ТАБ макс} \leq E_{ТАБ мин} / (2R_{ТАБ макс}).$$

Так как по мере разряда батареи уменьшается ЭДС и возрастает внутреннее сопротивление, то максимальный пусковой ток следует вычислять для  $Q = 20...25$  %. Например, для батареи указанного типа максимальный пусковой ток не должен превышать 420 А.

2

В отличие от ТАБ, позволяющих аккумулировать электрическую энергию для последующей отдачи её потребителю, топливные элементы предназначены только для получения электрической энергии в процессе реакции окисления. Также как и ТАБ батареи топливных элементов (БТЭ) сравниваются по внешним характеристикам  $U_{БТЭ}(I_{БТЭ})$ . Внешняя характеристика  $U_{БТЭ}(I_{БТЭ}, q_T)$  имеет падающий характер, причем значение динамического сопротивления обуславливается удельным расходом реагентов (топлива  $q_T$  и окислителя  $q_{OK}$ , если это не кислород воздуха) и реализуемой мощностью.

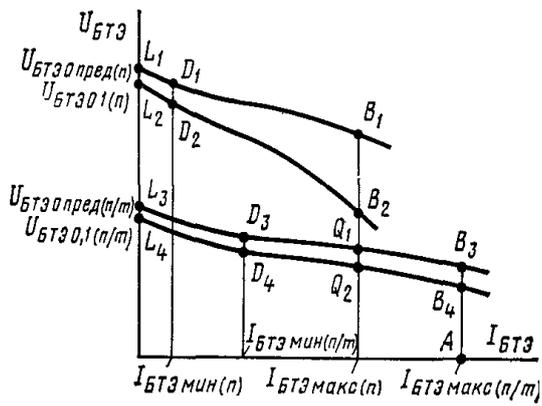


Рис. 4.5

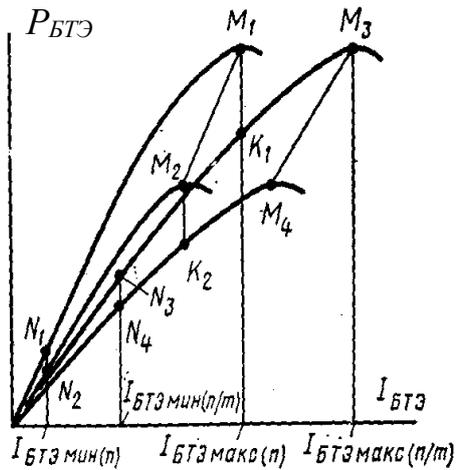


Рис. 4.6

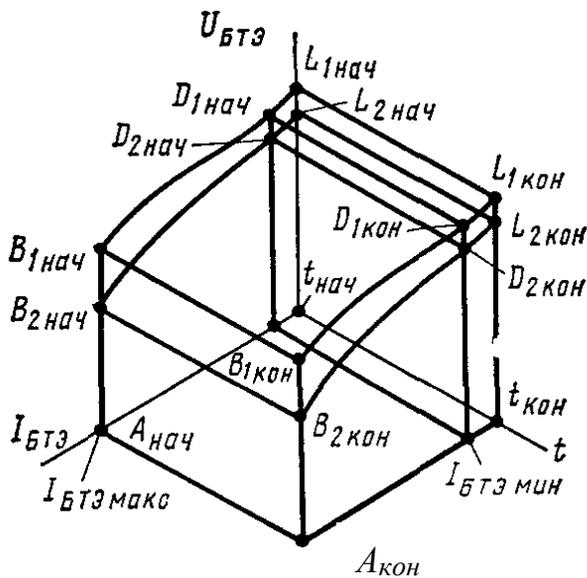


Рис. 4.7

В рабочем диапазоне тока нагрузки  $I_{BTЭ} \in [I_{BTЭ\min}; I_{BTЭ\max}]$  внешняя характеристика ЭУ этого типа может быть аппроксимирована уравнением

$$U_{BTЭ} = U_{BTЭ0}(q_m) - r_{qT} I_{BTЭ},$$

где  $U_{BTЭ0}(q_m)$  – напряжение ЭУ при  $I_{BTЭ} = 0$ ;  $r_{qT}$  – коэффициент жесткости внешней характеристики ЭУ, определяемый динамическим сопротивлением и соответствующий удельному расходу топлива  $q_T$ . Указанные характеристики представлены на рис.4.5 кривыми  $D_1B_1$  (предельная  $q_T = q_{T.МАКС}$ ) и  $D_2B_2$  (частичная  $q_T = q_{Ti} < q_{T.МАКС}$ ).

Чтобы исключить превышение допустимой нагрузки на единичный элемент БТЭ и вместе с тем обеспечить необходимый диапазон изменения тока  $I_{BTЭ}$ , применяют последовательно-параллельное переключение элементов или их групп. Тогда, если ЭУ содержит всего  $n$  элементов, то внешние характеристики  $D_1B_1$  и  $D_2B_2$  (рис.4.5) соответствуют их последовательному соединению:  $U_{BTЭ} = U_{BTЭ(n)}(I_{BTЭ}, q_T)_{qT} I_{BTЭ}$ , характеристики  $D_3B_3$  (предельная,  $q_T = q_{T.МАКС}$ ) и  $D_4B_4$  (частичная,  $q_T = q_{Ti} < q_{T.МАКС}$ ) – параллельному соединению элементов в  $m$  ветвей с  $n/m$  последовательно включенными элементами в каждой ветви:  $U_{BTЭ} = U_{BTЭ(n/m)}(I_{BTЭ}, q_T)$ .

На рис.4.6 представлены зависимости  $P_{BTЭ}(I_{BTЭ})$  энергоустановки с топливными элементами. Здесь кривые  $N_1M_1$ ,  $N_2M_2$  соответствуют характеристикам  $D_1B_1$ ,  $D_2B_2$  на рис.4.4;

прямые  $M_1M_2$  и  $M_3M_4$  суть ограничения мощности в функции  $q_T, n, m$ . При переключении элементов с последовательного на параллельное соединение кривые  $N_1M_1K_1M_3$ ,  $N_2M_2K_2M_4$  (рис.4.5) соответствуют внешним характеристикам  $D_1B_1Q_1B_3$ ,  $D_2B_2Q_2B_4$  (см. рис.4.4).

Функциональная связь в БТЭ между параметрами  $U_{BTЭ}$ ,  $I_{BTЭ}$ ,  $t$  для случаев  $q_T = q_{T.МАКС}$  и  $q_{Ti} < q_{T.МАКС}$  в трехмерном пространстве состояний изображается (рис. 4.7) поверхностями  $A_{НАЧ}B_{1НАЧ}D_{1НАЧ}D_{1КОН}B_{1КОН}A_{КОН}$  и  $A_{НАЧ}B_{2НАЧ}D_{2НАЧ}D_{2КОН}B_{2КОН}A_{КОН}$ .

Таким образом, внешние характеристики БТЭ –  $U_{ЭУ}(I_{ЭУ})$  и зависимости  $P_{ЭУ}(I_{ЭУ})$  варьируют только с изменением параметров управления, а именно:  $q_T$  (или  $q_{OK}$ ),  $n, m$  в интервале токов нагрузки  $I_{ЭУ} \in [0; I_{ЭУ\max}]$  в течение времени  $t \in [t_{НАЧ}; t_{КОН}]$  все ограничения внешних

характеристик остаются неизменными, т.е. они инвариантны количеству запасенной или израсходованной энергии.

3

Внешняя характеристика комбинированной энергоустановки (КЭУ) сочетанием источников энергии, когда используют два различных типа ТАБ, обусловлена их свойствами и представляет собой нелинейную функцию нагрузки ТЭД и времени работы привода в режимах тяги и рекуперативного торможения. Поэтому определяющим критерием при оценке подобной энергоустановки остается обеспечение максимального пробега электромобиля при наиболее рациональном использовании запасенной энергии.

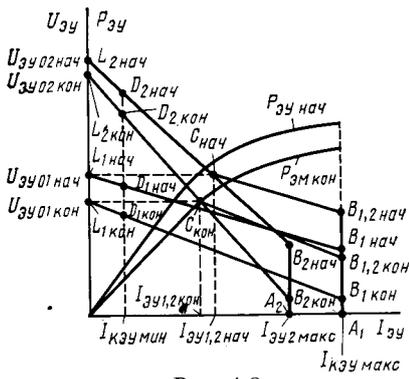


Рис. 4.8

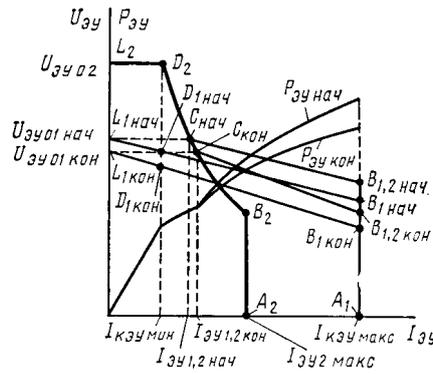


Рис. 4.9

режимов на внешние характеристики не являются определяющими показателями. Иначе: внешние характеристики КЭУ обусловлены как типом применяемых источников и их режимами в течение транспортного цикла электромобиля, так и соответствующим сочетанием свойств и характеристик каждого из них.

Внешние характеристики двух указанных типов КЭУ приведены на рис. 4.8 и 4.9 (для упрощения характеристики ТАБ показаны линейными).

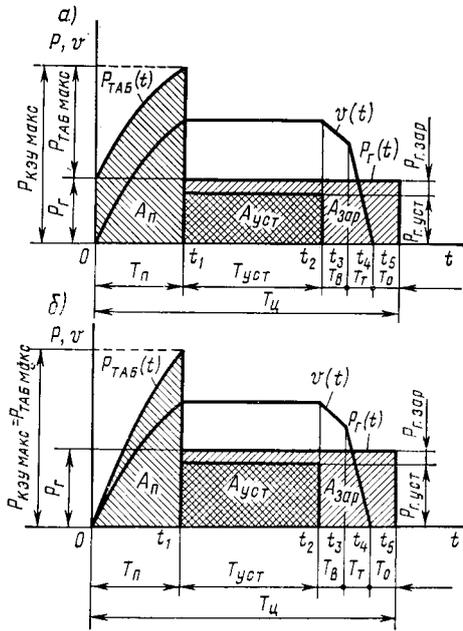


Рис. 4.10

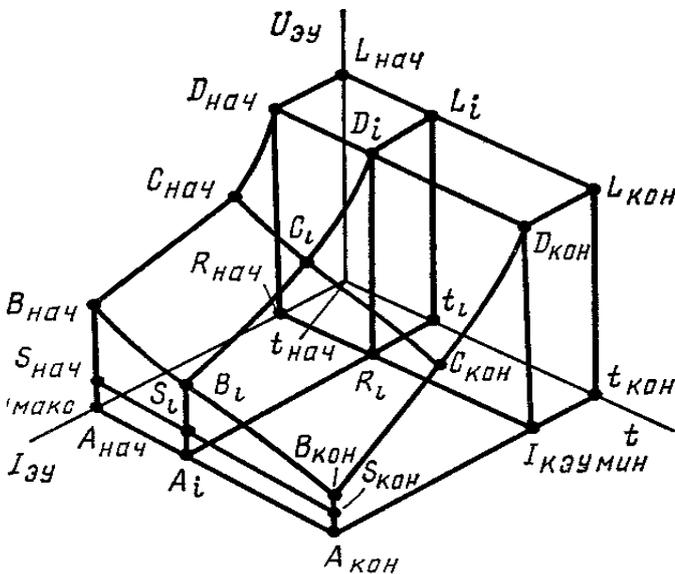


Рис.4.11

В КЭУ со вторым сочетанием источников, где пусковой источник – ТАБ, а тяговый – теплоэлектрический преобразователь (ТЭП), аккумуляторная батарея работает непродолжительное время, имеет сравнительно небольшой запас энергии и обеспечивает в основном требуемую динамику разгона электромобиля, а его общий пробег за транспортный цикл осуществляется за счет энергии ТЭП, у которого способы пополнения запаса энергии (топлива) и влияние

на рис. 4.10 и 4.11 внешние характеристики ТАБ и КЭУ показаны для моментов начала  $t_{нач}$  и конца  $t_{кон}$  цикла. В рабочем интервале токов  $I_{КЭУ} \in [I_{КЭУ мин}; I_{КЭУ макс}]$  характеристики пускового источника  $A_1 B_{1нач} D_{1нач}$  и  $A_1 B_{1кон} D_{1кон}$ ; тяговых источников: аккумулятора  $A_2 B_{2нач} D_{2нач}$  и  $A_2 B_{2кон} D_{2кон}$ , теплоэлектрического преобразователя  $A_2 B_2 D_2$ . При выборе пускового источника следует обеспечивать выполнение условия  $I_{ЭВ1 макс} > I_{КЭУ макс}$ . Запас по току  $(I_{ЭВ1 макс} - I_{КЭУ макс})$  должен быть таким, чтобы при пуске электромобиля на зажимах КЭУ было необходимое напряжение  $U_{КЭУ}$ , соответствующее ординатам точек  $A_1 B_{1нач} D_{1нач}$  (рис. 4.8 и 4.9). Тогда внешние характеристики КЭУ суть кривые  $A_1 B_{1,2нач} C_{нач} D_{2нач}$ ,  $A_1 B_{1,2нач} C_{нач} D_2$  в момент  $t_{нач}$  и кривые  $A_1 B_{1,2кон} C_{кон} D_{2кон}$ ,  $A_1 B_{1,2кон} C_{кон} D_2$  в момент  $t_{кон}$ .

На рис. 4.8 и 4.9 приведены также зависимости  $P_{эу}(I_{эу})$ , соответствующие началу и концу транспортного цикла.

В СТПЭ с КЭУ источники энергии могут питать ТЭД одновременно или поочередно. При одновременной работе (рис. 4.10а) один из источников энергии (здесь ТЭП) функционирует непрерывно при постоянной мощности генератора  $P_Г$ . Требуемая в течение времени  $T_п$  пуска и разгона максимальная мощность  $P_{ЭВ1 макс}$  достигается суммированием мощности  $P_Г$  и разрядной мощности аккумуляторной батареи  $P_{ТАБ}(t)$ , обеспечивая энергию  $A_п$  расходуемую на разгон подвижного состава до установившейся скорости  $v(t) = v_{уст} = const$ . По окончании разгона в момент времени  $t = t_1$  ТАБ отключают; поддержание постоянной скорости движения в течение времени  $T_{уст}$  осуществляется за счет части мощности генератора  $T_{Г уст}$ , обуславливая расход энергии  $A_{уст}$ . В момент  $t = t_2$  подвижного состава переводят в режим выбега в

течение времени  $A_{зар}$ . Далее за время  $T_T$  идет процесс торможения. Энергия  $A_{зар}$ , которую дает генератор, расходуется на подзаряд батареи: за время  $T_{уст}$  – за счет мощности  $P_{Гзар} = P_G - P_{Густ}$ , а за время  $T_B + T_T + T_0$ , – за счет мощности  $P_G$ .

При поочередной работе источников (рис. 4.10б) в течение времени  $T_{II}$  работает только ТАБ и при достижении скорости  $v_{уст}$  включают второй источник, а батарею отключают. Мощность  $P_G$  за время  $P_{уст}$  расходуется как на поддержание заданной скорости, так и на подзаряд ТАБ, а за время  $T_B + T_T + T_0$  — только на восстановление запаса энергии батареи.

Для КЭУ с пусковым (ТАБ) и тяговым (ТЭП) источниками, работающими одновременно, предельная внешняя характеристика в трехмерном пространстве  $(U_{ЭУ}, I_{ЭУ}, t)$  соответствует поверхности  $S_{нач} B_{нач} C_{нач} D_{нач} L_{нач} L_{кон} D_{кон} C_{кон} B_{кон} S_{кон}$  (рис. 1.57). Здесь отрезки  $A_{нач} S_{нач} = A_{кон} S_{кон}$  соответствуют напряжению  $U_{ТАБмин}$ .