

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСА

Канд. техн. наук САФОНОВ А. И.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Технико-экономические показатели троллейбуса при движении его от автономной энергетической установки (АЭУ) во многом определяются характеристиками тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ).

Как известно, электрические аккумуляторы имеют большой вес на единицу запасаемой энергии, поэтому для получения необходимого запаса хода на троллейбусе приходится устанавливать весьма тяжелые батареи. При прочих равных условиях вес батарей троллейбуса получится тем меньше, чем выше запасаемая энергия аккумуляторов, отнесенная к их весу, т. е. чем выше их удельная энергоемкость  $\omega_6$ . Вес аккумуляторов наряду с их стоимостью, сроком службы и КПД по энергии определяет экономику эксплуатации троллейбуса. Соответственно этому при оценке целесообразности применения в троллейбусах аккумуляторов того или иного типа, в первую очередь, необходимо сравнивать их названные выше параметры.

Практическое использование как в отечественном, так и в зарубежном электромобилестроении получили электрохимические аккумуляторные батареи, главным образом свинцово-кислотные ТАБ. В нашей стране достаточно широко используют никель-железные и никель-кадмиевые ТАБ, применяемые в троллейбусах [1].

Зарубежные свинцово-кислотные ТАБ имеют сравнительно большой срок службы и остаются пока единственными серийно выпускаемыми источниками для создания АЭУ городских электромобилей, несмотря на их низкую удельную энергоемкость (20–30 Вт·ч/кг). Недостаточную удельную энергоемкость и мощность этих ТАБ стремятся повысить, в частности, применением более тонких пластин в аккумуляторных элементах, добиваясь увеличения рассматриваемых показателей до значений 35–40 и 70–100 Вт·ч/кг при сохранении того же объема и массы, но срок службы аккумуляторов в этом случае существенно сокращается.

Для повышения энергетических показателей современных кислотных и щелочных ТАБ их снабжают дополнительными устройствами газоотвода и автоматического поддержания уровня электролита, а также системами контроля и регулирования теплоотдачи, степени заряженности и др. Однако ограниченные возможности упомянутых ТАБ обуславливают необходимость создания новых перспективных электрохимических аккумуляторных ЭУ со значительно лучшими характеристиками (удельной энергоемкостью не ниже 200–250 Вт·ч/кг).

Среди ряда новых электрохимических аккумуляторов, разрабатываемых для ЭУ электромобилей, необходимо отметить литий-серные, натрий-серные высокотемпературные ТАБ, хлорно-цинковые, никель-цинковые ТАБ, работающие при нормальной температуре. Применение в таких ТАБ высокоактивных, несовместимых с водными растворами электродов (литиевых, натриевых и др.) предопределило использование

электролитов на основе органических растворителей, расплавленных солей и даже твердых электролитов.

Параметры некоторых ТАБ представлены в табл. 1 [2].

Таблица 1

Тип аккумулятора	Рабочая температура, °С	Напряжение на элементе, В	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Срок службы (число циклов)
Применяемые в настоящее время:					
свинцово-кислотные	40–50	2,06	20–60	50–250	300–1000
никель-железные	0–40	1,40	30–60	50–200	1500–2000
никель-кадмиевые	40–60	1,30	20–50	200–500	1000
Перспективные:					
хлорно-цинковые	60	2,1	65–115	60–155	100–2000
натрий-серные	300–350	1,8–2,1	40–300	150–200	200–1000
литий-сульфид-железные	350–450	1,8–2,3	75–150	50–200	230–1000
никель-цинковые	–	1,7	40–90	100–300	200–700

Запас хода троллейбуса зависит не только от удельной энергоемкости, которая характеризует весовые показатели аккумуляторов при номинальном разрядном режиме, но также и от величины отдачи аккумуляторов при токах нагрузки, отличных от номинального. Известно, что с повышением разрядного тока аккумуляторы отдают меньшее количество энергии, т. е. используются при этом не в полной мере. У свинцовых аккумуляторов отдача зависит еще и от наличия пауз между отдельными периодами разряда. При наличии таких пауз отдача аккумуляторов возрастает.

При установившемся режиме движения троллейбусов разрядный ток аккумуляторов имеет постоянную величину. Для этого случая запас хода троллейбуса  $L_y$  может быть определен с учетом коэффициента отдачи с помощью зависимости, предложенной в [3], и ее некоторого дополнения:

$$L_y = \frac{w_6 G_6}{G_\Sigma (k_f + k_v V_y^2 + k_\alpha)} n^{-1} \sqrt{\frac{0,2 w_6 G_6}{G_\Sigma V_y (k_f + k_v V_y^2 + k_\alpha)}}, \quad (1)$$

где  $k_f$  – расход энергии на преодоление сопротивления качению, отнесенный к 1 км·кг, Вт·ч/км /кг;

$k_v$  – расход энергии на преодоление сопротивления воздуха, отнесенный к 1 км·кг и квадрату скорости движения, Вт·ч/км /кг/(км/ч)<sup>2</sup>;

$k_\alpha$  – расход энергии на преодоление уклона, отнесенный к 1 км·кг, Вт·ч/км /кг;

$G_6$  – масса аккумуляторной батареи, кг;

$G_\Sigma$  – общая масса троллейбуса, кг;

$V_y$  – скорость движения троллейбуса, км/ч;

$w_6$  – удельная энергоемкость батареи, Вт·ч/кг.

Показатель корня  $n$  для щелочных аккумуляторов в (1) должен быть принят 5, для свинцово-кислотных – 3...3,5. Из (1) следует, что при заданном отношении  $\alpha = G_6/G_\Sigma$  запас хода троллейбуса снижается по мере

увеличения его скорости  $V_y$ . Объясняется это уменьшением отдачи аккумуляторов, происходящей вследствие повышения их разрядного тока с возрастанием скорости троллейбуса. Указанное увеличение разрядного тока имеет место из-за возрастания мощности, потребляемой тяговым двигателем, как за счет повышения скорости, так и за счет возрастания сопротивления движению. По изложенным причинам максимальную скорость троллейбусов обычно ограничивают величинами 30–35 км/ч.

В результате анализа (1), учитывающего, что суммарный расход энергии  $k_\Sigma$ , отнесенный к 1 км·кг, т. е.  $k_\Sigma = k_f + k_v V_y^2 + k_\alpha$ , в зависимости от средней скорости движения  $V_y$  и наличия уклонов на маршруте следования находится в пределах 0,12...0,15 Вт·ч/км/кг [4], были получены соотношения между массовой долей ТАБ  $\alpha = G_6/G_\Sigma$ , удельной энергией батареи и дальностью пробега троллейбуса (рис. 1).

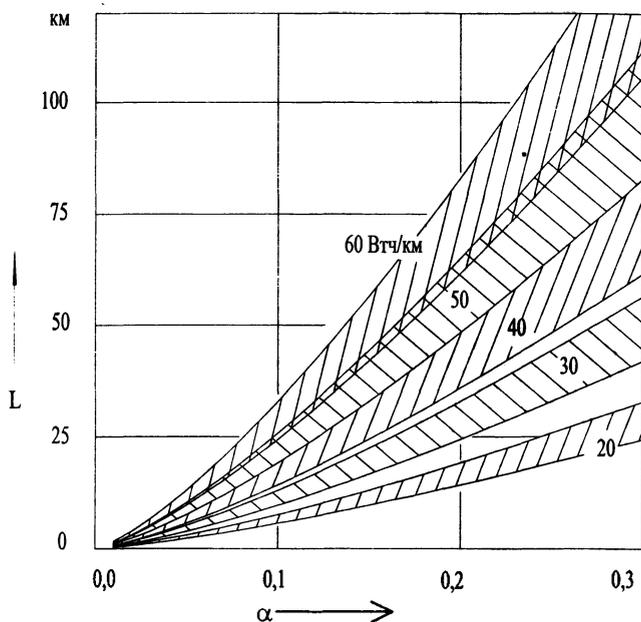


Рис. 1

Верхняя и нижняя границы полос соответствуют минимальному и максимальному значениям  $k_\Sigma$ .

Реальные условия эксплуатации троллейбуса характеризуются большим числом остановок, связанных с частыми разгонами и торможениями. При разгоне троллейбуса имеют место потери энергии в пусковых реостатах, а при частых торможениях кинетическая энергия его теряется в тормозах. Вследствие этого происходит снижение запаса хода троллейбуса по сравнению с установившимся режимом движения. Поэтому для расчета запаса хода троллейбуса  $L$  при его движении с остановками в (1) необходимо ввести соответствующий поправочный коэффициент  $k_L$ , приближенное значение которого может быть найдено с помощью кривой, приведенной на рис. 2 [3].

Найденному значению коэффициента  $k_L$  и заданному запасу хода  $L$  соответствует определенное отношение  $G_6/G_\Sigma$ . Оно находится с помощью (1) при подстановке в нее величины

$$L_y = \frac{L}{k_L}.$$

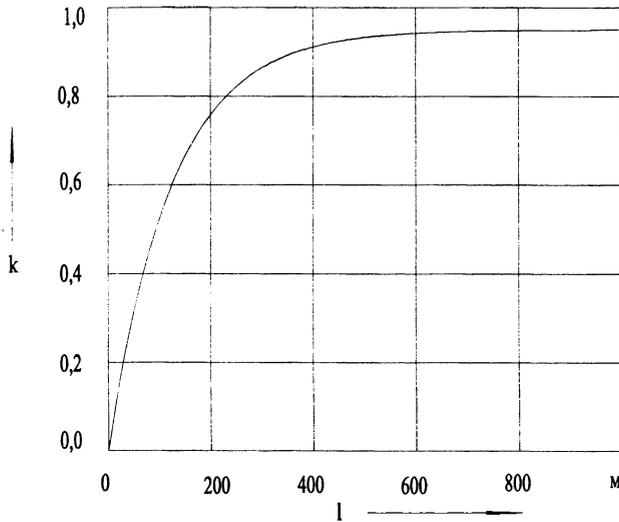


Рис. 2. Зависимость коэффициента, определяющего условия эксплуатации, от расстояния между остановками

Масса батареи троллейбуса определяется по формуле

$$G_6 = \frac{G_n(G_6/G_\Sigma)}{1 - b_1 - G_6/G_\Sigma}, \quad (2)$$

где  $G_n$  — полезная грузоподъемность троллейбуса;  $b_1 = G_k/G_\Sigma$  — отношение массы ходовой части и кузова  $G_k$  к полной массе троллейбуса  $G_\Sigma$ .

При проведении предварительных расчетов троллейбусов, когда еще не известны их конструкция и весовые параметры, величина коэффициента  $b_1$  может быть принята из интервала 0,22...0,3 [3].

Запас энергии в батарее  $A_n$  и номинальная емкость аккумуляторов определяются с помощью формул:

$$A_n = w_6 G_6, \text{ Вт.ч}; \quad (3)$$

$$C_n = \frac{A_n}{U_n}, \text{ А.ч}, \quad (4)$$

где  $U_n$  — выбранное номинальное напряжение аккумуляторной батареи.

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

$$P_d = \pm P_k + P_T \pm P_a \pm P_n. \quad (5)$$

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

$$P_{\Sigma} = P_{д} / (\eta_{м} \eta_{\Sigma}) + P_{всп},$$

где

$$\eta_{\Sigma} = 0,7; \eta_{м} = 0,95; P_{всп} \approx 3 \text{ кВт [4]}.$$

Таким образом, можно сделать следующие основные выводы по выбору ТАБ, используемых на троллейбусах:

емкость и энергия, отдаваемые аккумуляторами, изменяются в зависимости от их разрядного режима, уменьшаясь по мере возрастания разрядного тока; при эксплуатации троллейбусов имеет место колебание тока ТАБ в значительных пределах, поэтому расчет запаса хода необходимо проводить с учетом изменяющейся отдачи аккумуляторов в зависимости от режима их разряда;

на основании результатов испытаний аккумуляторов различных систем [3] установлены значения коэффициентов отдачи аккумуляторов, которыми целесообразно пользоваться для получения правильных результатов при расчетах запаса хода троллейбусов в зависимости от режима их движения;

определение целесообразности использования ТАБ того или иного типа можно осуществлять в двух направлениях: используя энергетические, мощностные, весовые, стоимостные и другие данные имеющейся батареи, рассчитывается запас хода троллейбуса, движущегося по определенному маршруту (задается средняя длина пути между остановками, учитывается скорость движения и наличие уклонов); либо исходя из необходимого запаса хода троллейбуса, движущегося по реальному маршруту, определяется конкретная батарея, удовлетворяющая требованиям потребителя.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Т р о л л е й б у с ы: Устройство и техническое обслуживание / Под ред. Н. В. Богдана. – Мн., 1997. – 154 с.
2. Т е о р и я и расчет тягового привода электромобилей / Под ред. И. С. Ефремова. – М.: Высш. шк., 1984. – 383 с.
3. П о л я к Д. Г. Выбор электрооборудования аккумуляторных автомобилей (электромобилей). – М.: НАМИ, 1959. – 40 с.
4. Э л е к т р о м о б и л ь. Техника и экономика / Под ред. В. А. Щетины. – Л.: Машиностроение, 1987. – 253 с.

Представлена кафедрой  
гидропневмоавтоматики  
и гидропневмопривода

Поступила 30.03.2000