

УДК 621.355

А.Н. Козлов, МАДИ,
e-mail: startfest@yandex.ru

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЗАРЯДА И ЕМКОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ
КОНДЕНСАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ И ХИМИЧЕСКИХ
АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ**

Аннотация. Представлена сравнительная оценка характеристик, режимов работы, КПД, процессов заряда, а также применения и перспектив развития тяговых, бортовых источников тока, таких как электрохимический конденсатор и химический аккумулятор.

Ключевые слова: тяговый источник тока, емкость, свойства.

A.N. Kozlov, MADI,
e-mail: startfest@yandex.ru

**COMPARATIVE EVALUATION OF THE PROPERTIES
OF ELECTRIC CHARGE AND CAPACITANCE
OF THE ELECTROCHEMICAL CAPACITOR MODULES
AND CHEMICAL BATTERIES**

Abstract. Presents a comparative evaluation of the characteristics, modes of operation, capacity, and application and development prospects of traction, on-Board power sources, such as an electrochemical capacitor and a chemical battery.

Key words: traction power supply, capacitance, properties.

Введение

На сегодняшний день доминируют два типа устройства накопления, хранения и возврата электрической энергии – это химические

аккумуляторы (ХА) и электрохимические конденсаторы (ЭХК). Проблема эффективного хранения и оптимального возврата электрической энергии заставляет более детально изучить свойства электрического заряда и процесса зарядки этих устройств, с целью выявления перспективного направления развития и усовершенствования тяговых источников тока транспортных средств.

Постановка задач

Сравнить и проанализировать характеристики представленных накопителей электрической энергии. Определить их преимущества и недостатки. Исследовать процесс заряда накопителей, выявить пути усовершенствования этого процесса.

Исследовательская часть

Для данной работы были использованы устройства, имеющие похожие по номинальному значению характеристики.

Определения, принцип действия, технические характеристики

Электрохимические конденсаторы относятся к устройствам, накопление электрической энергии в которых происходит в двойном электрическом слое (ДЭС) на границе электронного проводника и электролита. Двойной электрический слой создается поверхностью заряженного проводника и слоем прилежащих к нему ионов электролита. Двойной электрический слой можно рассматривать как конденсатор с двумя обкладками, емкость которого пропорциональна площади обкладок и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Принимая во внимание, что расстояние между обкладками очень мало и измеряется ангстремами, а величина поверхности проводника, например, активированного угля, достигает 1500–2000 кв.м/г, емкость образованного

таким образом двойного слоя очень велика и энергия, запасаемая такими конденсаторами, может достигать 50–60 Дж/г. Принципиально традиционный электрохимический конденсатор представляет собой систему, состоящую из двух химически инертных электродов, помещенных в электролит.

Двойной электрический слой на поверхности каждого электрода представляет собой отдельный конденсатор. Между собой они соединены последовательно через электролит, являющийся проводником с ионной проводимостью. При производстве электрохимических конденсаторов используют водные и органические электролиты. Водные электролиты дешевле, просты в обращении, не загрязняют окружающую среду. Органические электролиты позволяют увеличить рабочее напряжение конденсатора и, соответственно, удельную запасаемую энергию, однако обладают худшей электропроводностью, являются дорогими и горючими, имеют сложный процесс производства (не допускают попадания в электролит паров воды), часто небезопасны в экологическом отношении.

Внешне электрохимический конденсатор (как и любой другой электрохимический конденсатор) ведет себя аналогично традиционному конденсатору, а именно: линейно изменяет напряжение при заряде и разряде постоянным током либо разряжается на нагрузку по экспоненте, имеет малое внутреннее сопротивление и высокую мощность, значительно превышающую мощность аккумуляторов, обладает ресурсом в миллионы циклов «заряд-разряд» и длительным сроком службы.

ЭКХ последовательно соединяются в модули.

Химический аккумулятор – устройство в котором химическая энергия активных веществ (окислителя и восстановителя) преобразуется в электрическую. Он состоит из одной или нескольких ячеек – гальванических элементов. Гальванический элемент состоит из двух электродов, разделенных электролитом. Электроды изготовлены из

проводников первого рода, т.е. проводников с электронной проводимостью. Электролитом служат проводники второго рода – жидкие (растворы, расплавы) или твердые вещества, обладающие иной проводимостью. На границе между проводниками первого и второго рода появляется разность потенциалов и протекают электродные (токообразующие) реакции. Электродные реакции – это процессы окисления и восстановления. Электрод, на котором происходит окисление восстановителей, называется *анодом*. Электрод, на котором происходит восстановление окислителей, называется *катодом*. Восстановители – это вещества, отдающие электроны, а окислители – это вещества, принимающие электроны. Эти названия связаны только с направлением окислительно-восстановительного процесса, а не с зарядом электрода. Катод может иметь как положительный, так и отрицательный заряд.

На электродах устанавливается электродный потенциал E , который характеризует окислительную или восстановительную способность. Чем более сильный восстановитель участвует в электродной реакции, тем отрицательнее потенциал этого электрода. Чем более сильный окислитель участвует на другом электроде, тем положительнее потенциал этого электрода. Разность потенциалов между положительным и отрицательным электродами аккумулятора в отсутствии тока называют *напряжением разомкнутой цепи*.

$$U_{p.c.} = E(+)_p.c. - E(-)_p.c.$$

Электродные реакции протекают обязательно с участием электронов, причем в анодном процессе (восстановление) электроны переносятся от реагирующих частиц на электрод и направляются во внешнюю цепь, а в катодном процессе (окисление) электроны из внешней цепи поступают к реагирующим частицам. Суммарно реакции на разноименных электродах составляют токообразующую реакцию.

Аккумуляторы последовательно соединяют в батареи.

Таблица 1

Технические характеристики электрохимического конденсатора ЭК402

Рабочее напряжение, В	1,5–0,3
Максимальное рабочее напряжение, В*	1,6
Минимальное рабочее напряжение, В**	0,3
Емкость, Ф	10000
Запасаемая энергия в диапазоне рабочих напряжений, кДж	10,8
Внутреннее сопротивление +25(–30), мОм	0,3–0,4
Максимальная мощность при рабочем напряжении, кВт	1,9
Ток утечки при напряжении 1,4 В, мА	15
Ресурс, количество циклов не менее	1000000
Масса, кг	1,1
Габаритные размеры ($L \times W \times H$), мм	83,5×31,5×210
Диапазон рабочих температур	От –50 до +60
Температура хранения	От –60 до +70

* Напряжение, при котором может находиться конденсатор в течение не продолжительного времени.

** Конденсатор может разряжаться до нулевого напряжения, однако храниться должен при напряжении не менее указанного в таблице (0,3 В).

Таблица 2

Технические характеристики аккумулятора
свинцово-кислотного тягового ЭН-400-У2

Номинальное напряжение, В	2,0
Номинальная емкость, А·ч (при 5-часовом режиме разряда)	400
Масса без электролита, кг	25
Масса с электролитом, кг	31
Габаритные размеры ($L \times B \times H$), мм	174×130×484
Разрядный ток, А	64 или 80
Конечное напряжение, В	1,7
Работоспособен при температурах окружающей среды	От –40 до +40
Ресурс, количество циклов не менее	500
Гарантийный срок хранения, лет	4

Среднесуточный саморазряд заряженного аккумулятора после 15-суточного бездействия не превышает 1% номинальной емкости.

Проведя анализ конструкции, технических характеристик (табл. 1, табл. 2) и принципа действия представленных устройств, легко заметна разница по основополагающему критерию – емкости.

Основной значимой характеристикой хранения электрической энергии является емкость. Способ ее образования и процессы

возникновения заряда необходимой емкости в изучаемых устройствах довольно сильно отличаются.

Электрическую емкость электрохимического конденсатора рассчитывают по формуле:

$$C = I \cdot t / U,$$

где C – емкость, Ф; I – постоянный ток разрядки, А; U – номинальное напряжение ЭХК, В; t – время разрядки от $U_{\text{ном}}$ до нуля.

Напряжение на ЭХК понижается линейно от рабочего значения до нуля и ему не соответствуют такие плоские зоны характеристики разряда как у аккумулятора.

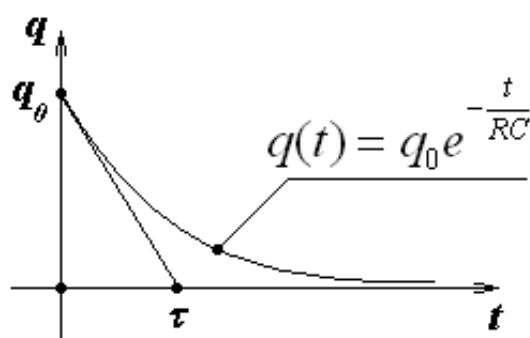


Рис. 1. Кривая разряда конденсатора

Заряд в ЭХК, оставшийся при достижении минимального напряжения, остается не использованным.

Емкость, аккумулятора рассчитывается исходя из количества электроэнергии в Вт·ч, потребляемого от аккумулятора в режиме разряда.

В аккумуляторах емкость измеряется в ампер-часах: Одна батарея емкостью 100 А·ч может питать нагрузку током 1 А в течение 100 ч, или током 4 А в течение 25 ч. Емкость батареи снижается при увеличении разрядного тока.

Возникает ряд вопросов: почему два приспособления, выполняющих одну и ту же работу, имея единый электрический параметр, маркируются

разными единицами измерения? Можно и целесообразно ли приводить эти приспособления к единой шкале измерения?

Необходимо детально рассмотреть данную характеристику, ее природу, от чего она зависит у каждого из рассматриваемых устройств.

Электрическая емкость: при сообщении проводнику заряда на его поверхности появляется потенциал ϕ , но если этот же заряд сообщить другому проводнику, то потенциал будет другой. Это зависит от геометрических параметров проводника.

Но в любом случае потенциал ϕ пропорционален заряду q .

$$q = C\phi.$$

Коэффициент пропорциональности C называют *электроемкостью* – физическая величина, численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\phi}.$$

Единица измерения емкости – *фарада*. $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}$.

Емкость конденсатора также измеряется в фарадах. Если между двумя телами емкость составляет один фарад (Ф), Farad (F), это значит, что при переносе заряда в один кулон напряжение изменится на один вольт:

$$[\text{Изменение напряжения, В}] = [\text{Перенесенный заряд, К}] / [\text{Емкость, Ф}].$$

Помня, что перенесенный заряд равен силе тока, помноженной на время его протекания, запишем формулу в более привычном виде:

$$[\text{Изменение напряжения}] \text{ В} = [\text{Сила тока}] \text{ А} \cdot [\text{Время}] \text{ с} / [\text{Емкость}] \text{ Ф}.$$

Пусть емкость конденсатора X [фарад], напряжение Y [вольт]. Тогда заряд на нем

$$\begin{aligned} Q &= XY \text{ [кулон]} = XY \text{ [ампер}\cdot\text{секунда]} = \\ &= XY \text{ [ампер}\cdot\text{час}/3600] = XY/3600 \text{ [ампер}\cdot\text{час]}. \end{aligned}$$

$$\text{Фарад} = \text{Кулон} / \text{Вольт}.$$

$$\text{Кулон} = \text{Ампер}\cdot\text{сек} = 1/3600 \text{ Ампер}\cdot\text{час} \Rightarrow 1 \text{ Ф}, 1 \text{ В} = 1/3600 \text{ А}\cdot\text{ч}.$$

Конденсатор – прибор с нормированной емкостью. Электронный прибор, который специально предназначен для изменения напряжения пропорционально накопленному заряду.

Ток в один Ампер, заряжает конденсатор емкостью один Фарад на один Вольт за одну секунду.

Емкостью аккумулятора называется способность его отдавать определенное количество электричества во время разряда, т.е. до того момента, когда напряжение на его зажимах снизится до значения, минимально допустимого для данного типа аккумулятора. Емкость выражается произведением силы разрядного тока в амперах на время разряда в часах.

$$1/3600/1,5 \cdot 10000 = 1,8 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

Приняв во внимание вышеизложенное, необходимо определить физическую производную емкости этих устройств (от чего зависит емкость).

Обозначим зависимость такого параметра как емкость у ЭХК.

Емкость конденсатора зависит от трех основных факторов:

1. Площадь пластин – А.
2. Расстояние между пластинами – d³.
3. Относительная диэлектрическая проницаемость вещества между пластинами – ε.

Площадь пластин. Чем больше площадь пластин конденсатора, тем больше заряженных частиц могут на них разместиться, и тем больше емкость.

Расстояние между пластинами. Емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Для того чтобы объяснить природу влияния этого фактора, необходимо вспомнить механику взаимодействия зарядов в пространстве (электростатику). Если конденсатор не находится в электрической цепи, то на заряженные

частицы, расположенные на его пластинах влияют две силы. Первая – это сила отталкивания между одноименными зарядами соседних частиц на одной пластине. Вторая – это сила притяжения разноименных зарядов между частицами, находящимися на противоположных пластинах. Получается, что чем ближе друг к другу находятся пластины, тем больше суммарная сила притяжения зарядов с противоположным знаком, и тем больше заряда может разместиться на одной пластине.

Относительная диэлектрическая проницаемость. Не менее значимым фактором, влияющим на емкость конденсатора, является такое свойство материала между обкладками, как относительная диэлектрическая проницаемость ϵ . Это безразмерная физическая величина, которая показывает во сколько раз сила взаимодействия двух свободных зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме. Материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью позволяют обеспечить большую емкость. Объясняется это эффектом поляризации – смещением электронов атомов диэлектрика в сторону положительно заряженной пластины конденсатора.

Поляризация создает внутренне электрическое поле диэлектрика, которое ослабляет общую разность потенциала (напряжения) конденсатора. Напряжение U препятствует притоку заряда Q на конденсатор. Следовательно, понижение напряжения способствует размещению на конденсаторе большего количества электрического заряда. Ниже приведены примеры значений диэлектрической проницаемости для некоторых изоляционных материалов, используемых в конденсаторах.

Воздух – 1,0005, бумага – от 2,5 до 3,5, стекло – от 3 до 10, слюда – от 5 до 7, порошки оксидов металлов – от 6 до 20.

В химических аккумуляторах емкость зависит от химических свойств элементов, электрохимической системы этого устройства, проводников первого и второго рода, на границах которых появляется

разность потенциалов и протекают электродные реакции. В настоящее время больше всего используются сравнительно дешевые свинцово-кислотные аккумуляторы. Более высокие показатели имеют серебряно-кадмиевые аккумуляторы.

Сейчас в перечне технических характеристик появился еще один показатель, характеризующий свойство накопительного устройства сохранять заряд – это плотность энергии МДж/кг.

Для получения полноценного результата исследования необходимо провести сравнение значимых характеристик представленных накопителей электрической энергии (табл. 3). В таблице представлены параметры, указывающие на скорость заряда и разряда. Если у аккумулятора рассчитать время заряда и разряда не сложно, то чтобы выявить данные такого рода у конденсатора, разряд которого протекает линейно, необходимо применить формулу

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Результаты исследования данной работы необходимо подытожить по средствам выявления преимуществ и недостатков описываемых видов накопителей электрической энергии.

ЭХК преимущества: быстрый заряд, малое внутреннее сопротивление, работа при любом напряжении, не превосходящем номинального, отсутствие необходимости контроля за режимом зарядки, использование простых методов заряда, большой срок службы, неограниченное количество циклов заряд разряд.

Недостатки: малая энергетическая плотность, высокий саморазряд, низкое напряжение.

ХА преимущества: невысокая цена, малое внутреннее сопротивление, устойчивость к сильным токам разряда и заряда, большая емкость.

Недостатки: низкое значение удельной (отнесенной к 1 кг массы аккумулятора) энергии, запасаемой аккумулятором.

Таблица 3

Сравнительные зарядно-разрядные характеристики

Параметр	ЭХК	аккумулятор
Время заряда, с	1–30	1–6
Время разряда, ч	1–30	0,2–6
Удельная энергия, Вт·ч/кг	1–10	20–150
Удельная мощность, Вт/кг	1000–3000	100–500
Отдача по энергии, %	95–98	60–90
Число циклов	500000	300–2000

На основе результатов исследования необходимо сделать следующие выводы: электрохимические конденсаторы, имеющие высокие разрядные токи, но небольшую запасаемую энергию, на сегодняшний день не могут заменить химические аккумуляторы в выполнении задач по обеспечению электрической энергией транспортных средств на длительный период времени, соответственно, на длительные расстояния. Однако свойства по быстрой зарядке и отдаче больших мощностей имеют большие перспективы в создании новых инновационных электрических тяговых источников тока и систем электроприводов. Увеличение емкости до необходимых требований – это вопрос времени. В свою очередь разработчики химических аккумуляторов также не стоят на месте. Разнообразие химических составляющих этих устройств позволяет уменьшать массу и габаритные размеры, при этом увеличивать их емкость и мощность. Но более актуальным на сегодняшний день является конструктивный подход в применении этих двух представителей устройств накопления электрической энергии в системах энергообеспечения транспортных средств, ведь физические показатели присущие одному приспособлению, могут стать незаменимым дополнением другого.

Список литературы

1. Вольфкович Ю.М., Мазин В.М., Уриссон Н.А. Исследование работы двойнослойных конденсаторов на основе углеродных материалов // Электрохимия. 1998. Т. 34. С. 825.
2. Григорьев В. Ионисторы + аккумуляторы особенности применения // Электронные компоненты. 2000. № 2. С. 2.
3. Дасоян М.А., Агуф И.А. Современная теория свинцового аккумулятора. Л.: Энергия, 1975.
4. Коровин Н.В., Скундин А.М., Архангельская З.П. Химические источники тока. М.: МЭИ, 2003.
5. Русин А.И. Основы технологии свинцовых аккумуляторов. М., 1987.
6. Элтон ЗАО. Продукция. URL: <http://www.elton-cap.ru>

References

1. Volkovich, Y.M., Mazin V.M. Ourisson N.A. *Issledovanie raboti dvoinosloinih kondensatorov na osnove ugherodnih materialov* (Research work dolnoslaski of condensatori based carbon materials): sbornik, Electrophime, 1998, vol. 34, p. 825.
2. Grigorievv V. *Electronnye componenty*, 2000, no. 2, p. 2.
3. Dasojan M.A., Aguf I.A. *Sovremennaya teoriya svincovogo akkumulyatora* (Modern theory lead accumulator), Leningrad, Energy, 1975.
4. Korovin N.V., Skundin A.M., Arkhangelsk Z.P. *Himicheskie istochniki toka* (Chemical current sources), Moscow, MEI, 2003.
5. Rusin A.I. *Osnovi tehnologii svincovih akkumulyatorov* (Technology lead AK-cumulation), Moscow, 1987.
6. Elton CJSC. Products. URL: <http://www.elton-cap.ru>