

Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство

Виктор КУЗНЕЦОВ
Ольга ПАНЬКИНА
Наталья МАЧКОВСКАЯ
Евгений ШУВАЛОВ
Иван ВОСТРИКОВ
291@giricond.spb.ru

В статье изложены принципы функционирования и дана общая характеристика конденсаторов с двойным электрическим слоем (ионисторов); приведены параметры серийных и разрабатываемых в ОАО «НИИ Гириконд» ионисторов.

Введение

Современная электронная техника широко использует в качестве перезаряжаемых источников тока энергонакопительные электрические конденсаторы (оксидно-электролитические, керамические, с органическими диэлектриками и т. д.) и электрохимические источники тока (аккумуляторы) [1, 2].

При использовании в качестве источников тока энергонакопительные электрические конденсаторы имеют ряд преимуществ перед аккумуляторами:

- они могут эксплуатироваться в широком интервале температур (от -60 до $+125$ °С и выше) без обслуживания и замены в течение всего срока службы (до 20 лет и более);
- имеют большое количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» ($> 10^6$ циклов) без заметного ухудшения параметров;
- имеют высокую удельную мощность (десятки кВт/кг) и, благодаря небольшой постоянной времени RC, заряжаются и разряжаются очень быстро (практически мгновенно).

Однако накапливаемая конденсаторами в процессе зарядки удельная энергия невелика (около 1 кДж/кг), поэтому область их использования ограничивается применением в качестве мощных импульсных источников тока. Увеличение удельной энергии энергонакопительных конденсаторов — одна из актуальных проблем электронной техники.

Аккумуляторы (никель-кадмиевые, никель-гидридные, литий-ионные и т. д.), в отличие от конденсаторов, накапливают на два-три порядка большее количество энергии (10^2 – 10^3 кДж/кг) и широко используются в качестве автономных, периодически перезаряжаемых источников тока, однако их удельная мощность невелика (порядка 0,01–0,1 кВт/кг),

равно как и количество циклов «зарядка-разрядка» (порядка 10^2 – 10^3 циклов).

По величине удельной энергии и удельной мощности между традиционными типами аккумуляторов и конденсаторов существует «пробел», можно даже сказать «пропасть», как минимум, в 2 порядка. Этот «пробел» постепенно заполняется как разработчиками новых аккумуляторов с повышенной удельной мощностью ($> 0,1$ кВт/кг), так и разработчиками новых конденсаторов с повышенной удельной энергией (> 1 кДж/кг).

Однако для удовлетворения потребностей развивающейся техники этого явно недостаточно. Сегодня необходимы как конденсаторы с удельной энергией порядка десятков кДж/кг, так и аккумуляторы с удельной мощностью порядка 1–10 кВт/кг. Из-за отсутствия серийного производства таких накопителей энергии сдерживается развитие многих отраслей науки и техники, в том числе разработка и производство электромобилей с гибридными силовыми установками.

Существенный вклад в дело заполнения этого «пробела» сделан в последнее десятилетие благодаря созданию и развитию производства нового типа энергонакопительных электрических конденсаторов — конденсаторов с двойным электрическим слоем (ионисторов) — известных под названиями «суперконденсаторы», «гиперконденсаторы» (Япония), «ультраконденсаторы» (Германия, США), «электрохимические конденсаторы» (Франция, Канада) и т. п. [3, 4].

Некоторые типы таких конденсаторов способны накапливать удельную энергию более 10 кДж/кг и разряжаться на нагрузку с удельной мощностью порядка 1–10 кВт/кг [4].

В ОАО «НИИ Гириконд» конденсаторы с двойным электрическим слоем называются ионисторами [5] и поставляются под торговой маркой «ионистор®» [6].

Принципы функционирования ионисторов

В ионисторах энергия накапливается в процессе зарядки за счет поляризации двойных электрических слоев (ДЭС) на границах раздела «анод-электролит» и «катод-электролит».

Впервые модель двойного электрического слоя в системах «электрод-электролит» создал в 1879 году Гельмгольц и показал, что ДЭС по существу является конденсатором, одна из обкладок которого — заряженная поверхность электрода, а другая — слой ионов противоположного знака в электролите (ионного проводника). Впоследствии усилиями Гуи, Штерна и Фрумкина создана классическая теория строения и свойств ДЭС в водных электролитах, и, таким образом, был заложен фундамент для создания различных электрохимических преобразователей энергии и информации (в том числе и ионисторов). В частности, было установлено, что удельная емкость ДЭС весьма высока (около 0,2 Ф/м²), а скачок потенциала в двойном электрическом слое может достигать величины 1 В и даже выше.

Другими словами, система «электронный проводник — ионный проводник» в определенных условиях ведет себя как конденсатор, то есть при прохождении через такую систему тока изменяется межфазная разность потенциалов ϕ . Если эти изменения обратимы, то система может характеризоваться емкостью, определяемой для идеального конденсатора по формуле:

$$C = D\phi/Dq,$$

где $D\phi$ — изменение межфазной разности потенциалов, Dq — накопленный на межфазной границе заряд.

В концентрированных электролитах заряд на межфазной границе образован избыточным электронным (дырочным) зарядом поверх-

ности металлического электрода и избыточным ионным зарядом со стороны электролита. Ионы электролита плотно прижаты к поверхности электрода как силами изображения, так и электростатическим притяжением электронного заряда поверхности, так что расстояние между зарядами в двойном слое по порядку величины близко к радиусу иона. В электролите ионы, как правило, сольватированы, что несколько увеличивает их радиус.

Оценка диэлектрической проницаемости в области двойного слоя в системах «электронный проводник — ионный проводник» по формуле плоского конденсатора дает величину $\epsilon = 4,5$, тогда как для воды $\epsilon = 80$:

$$\epsilon = C_{y\delta} \times \delta / \epsilon_0 = 0,2 \times 2 \times 10^{-10} / 8,85 \times 10^{-12} = 4,5.$$

Низкую величину ϵ объясняют тем, что молекулы воды на межфазной границе сильно поляризованы, при этом радиус гидратированных ионов принят равным 2 \AA .

Если в обычных конденсаторах заряды разделены диэлектриком, то в ДЭС разделение зарядов на межфазной границе обусловлено термодинамической невозможностью или кинетической затрудненностью переноса зарядов в рабочем интервале электродных потенциалов $\Delta\phi$. Сопротивление переносу R можно в этом случае выразить как

$$R = \Delta\phi / I_{утечки}$$

В реальных системах ток утечки ($I_{утечки}$) отличается от нуля из-за наличия примесей в электролите или электродах с более низким потенциалом разложения, а также из-за наличия электронной составляющей проводимости в ионных проводниках (электролитах).

Электрическую прочность ДЭС можно определить по формуле $E = \Delta\phi / \delta$. В различных типах ионисторов используются ДЭС с интервалом потенциалов от 0,5 до 1,5 В. Если принять $\Delta\phi = 1,0 \text{ В}$, а $\delta = 2 \times 10^{-10} \text{ м}$, то электрическая прочность ДЭС составит:

$$E = 0,5 \times 10^{10} \text{ В/м} = 5000 \text{ МВ/м} = 5 \text{ ГВ/м}.$$

Величины электрической прочности диэлектриков других типов конденсаторов приведены в таблице 1.

В качестве электродов в ионисторах чаще всего используют микропористые электронные проводники с высокой удельной поверхностью, например, различные активированные углеродные материалы [7–11]. Такие материалы содержат большое количество пор с размера-

ми порядка 10^{-9} м и имеют удельную поверхность более $10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$. Расчеты показывают, что углеродные элементы, разделяющие поры, имеют размеры такого же порядка. При таком развитии площади поверхности и удельной емкости ДЭС $0,2 \text{ Ф/м}^2$ возможно получение удельной емкости $C_{y\delta} = 0,2 \text{ Ф/м}^2 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{кг} = 200 \text{ кФ}$ в 1 кг электрода.

Если рабочий интервал потенциалов электрода составляет, например, 1,0 В, то в электроде массой (m) в 1 кг возможно накопить $E_{y\delta} = C_{y\delta} \times \Delta\phi / 2 \text{ м} = 200 \times 1^2 / 2 = 100 \text{ кДж/кг}$ энергии.

Благодаря сочетанию высокой электрической прочности ДЭС с высокой удельной емкостью электродов возможно создание ионисторов с удельной энергией в десятки кДж/кг.

В отличие от аккумуляторов, заряд и разряд которых ограничен протекающими электрохимическими реакциями на электродах, ионисторы можно заряжать и разряжать «накоротко», так как ДЭС образно можно сравнить с пружиной, которая сжимается в процессе зарядки и отдает накопленную энергию в процессе разрядки. При заряде и разряде ионистор ведет себя как идеальный конденсатор, заряжаемый или разряжаемый через ограничительный резистор — внутреннее сопротивление. В случае использования электродов с высоким напряжением разложения (1–3 В) и низким удельным сопротивлением возможно создание ионисторов с удельной мощностью порядка 10 кВт/кг.

Сравнительные характеристики аккумуляторов, ионисторов и энергонакопительных конденсаторов

Сравнительные характеристики накопителей электрической энергии в наглядном виде принято рассматривать в координатах

«удельная энергия E (кДж/кг или Вт·час/кг; при этом $3,6 \text{ кДж/кг} = 1 \text{ Вт·час/кг}$) — удельная мощность P (кВт/кг)». На рисунке изображены такие характеристики и области перспективного развития некоторых типов аккумуляторов, ионисторов и конденсаторов с оксидными диэлектриками в логарифмическом масштабе.

Аккумуляторы на этом рисунке занимают верхний левый угол и охватывают область 1 по величине удельной энергии порядка 10^1 – 10^2 Вт·час/кг и по величине удельной мощности порядка 10^2 – 10^1 кВт/кг ; оксидно-электролитические конденсаторы занимают нижний правый угол и охватывают область 2 по величине удельной энергии порядка 10^2 – 10^1 Вт·час/кг и по величине удельной мощности порядка 10^1 – 10^2 кВт/кг , а характеристики ионисторов (область 3) расположены между ними.

По количеству циклов «зарядка-разрядка» (порядка 10^4 – 10^6), а также по величине диапазона рабочих температур (от -50 до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$) ионисторы также занимают промежуточное положение между аккумуляторами и оксидно-электролитическими конденсаторами.

Существенный недостаток ионисторов и аккумуляторов — низкое рабочее напряжение. Для увеличения рабочих напряжений или емкости ионисторы, так же, как и аккумуляторы, соединяются последовательно или параллельно в пакеты (батареи, модули).

Типы ионисторов

Существующие типы ионисторов, несмотря на большое их разнообразие, подразделяют на три типа [12–15]:

1. Ионисторы с идеально поляризуемыми углеродными электродами («идеальные» ионисторы). Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:

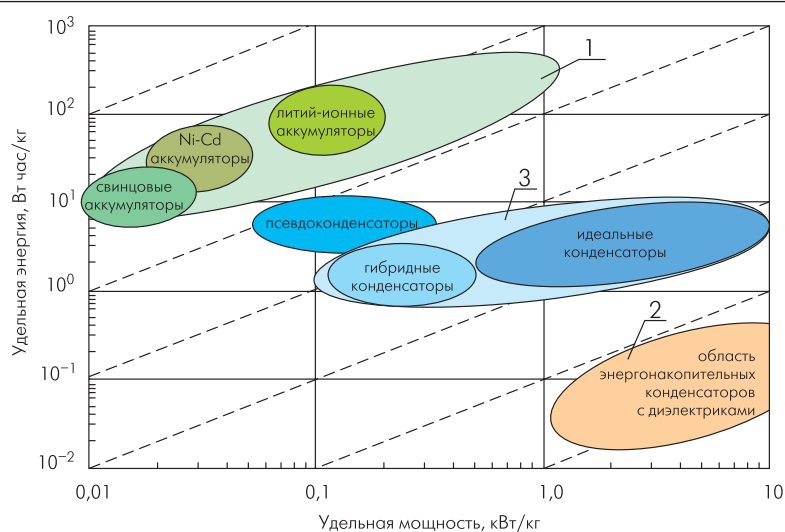


Рис. 1. Сравнительные характеристики электрохимических накопителей электрической энергии:
1 — область перспективного развития перезаряжаемых химических источников тока (аккумуляторы);
2 — область перспективного развития энергонакопительных конденсаторов с диэлектриками;
3 — область перспективного развития конденсаторов с двойным электрическим слоем

Таблица 1

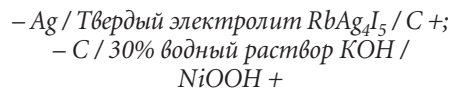
| Тип диэлектрика | Электрическая прочность, МВ/м |
|--|-------------------------------|
| Титанат бария | 4–8 |
| Воздух | 10–70 |
| Керамика (α-Al ₂ O ₃ корунд) | 30–45 |
| Слюда, кварц | 500–700 |
| ДЭС | более 1000 (до 7500) |

- C / 30% водный раствор KOH / C +;
- C / 38% водный раствор H₂SO₄ / C +;
- C / Органический электролит / C +.

В этом типе ионисторов на электродах в рабочем интервале напряжений не протекают электрохимические реакции, накладывающие известные ограничения на скорость зарядки и разрядки, поэтому по величине энергии и мощности, температурному диапазону и количеству циклов они ближе остальных типов к области 2 оксидно-электролитических конденсаторов. Емкость ионисторов типа 1 представляет собой емкость двух последовательно включенных через эквивалентное последовательное сопротивление ($R_{\text{экв}}$) ионисторов C_K и C_A .

2. Ионисторы с идеально поляризуемым углеродным электродом и неполяризуемыми или слабо поляризуемыми катодом или анодом («гибридные» ионисторы).

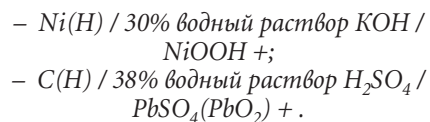
Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:



В этом типе ионисторов на одном из электродов (катоде или аноде) протекает электрохимическая реакция (как в аккумуляторах), поэтому их называют гибридными суперконденсаторами (гибрид конденсатора и аккумулятора). В конденсаторе с твердым электролитом $RbAg_4I_5$ реакция протекает на катоде: $Ag^+ + e \leftrightarrow Ag^0$, а в конденсаторе с 30% водным раствором KOH реакция протекает на аноде: $Ni^{+2} - e \leftrightarrow Ni^{+3}$.

Емкость ионисторов типа 2 в два раза выше, чем ионисторов типа 1, так как емкость неполяризуемого электрода замкнута сопротивлением протекающей электрохимической реакции. Эта реакция накладывает диффузионные и кинетические ограничения на скорость зарядки и разрядки ионисторов типа 2, поэтому по величине удельной энергии и мощности, температурному диапазону и количеству циклов ионисторы типа 2 ближе ионисторов типа 1 к области аккумуляторов.

3. Псевдоконденсаторы — это ионисторы, на поверхности электродов которых при заряде и разряде протекают обратимые электрохимические процессы (хемосорбция или интеркаляция ионов, содержащихся в электролите). Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:



По принципу накопления энергии псевдоконденсаторы можно отнести как к ионисто-

рам (если энергия накапливается только в поверхностном слое электродов), так и к аккумуляторам (если энергия накапливается не только в поверхностном слое, но и в объеме электродов).

Удельная энергия псевдоконденсаторов благодаря протеканию электрохимических реакций на обоих электродах сравнима с энергией, накапливаемой в аккумуляторах, однако величина удельной мощности и количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» могут быть на порядок выше того, что достигнуто в области аккумуляторов, так как диффузионные и кинетические ограничения удается минимизировать за счет увеличения площади поверхности электродов. По величине удельной энергии и мощности, температурному диапазону эксплуатации и количеству циклов псевдоконденсаторы ближе всех остальных типов конденсаторов к аккумуляторам.

Деление ионисторов на три типа позволяет ориентироваться в большом многообразии этих изделий как по типу используемых электрохимических систем, так и по эксплуатационным характеристикам.

Разработка и практическое использование ионисторов

Потребность в ионисторах возникла во второй половине XX века благодаря развитию низковольтной полупроводниковой электроники и росту потребности в перезаряжаемых источниках тока с большим количеством циклов и с требуемым соотношением удельной энергии и удельной мощности.

До создания конденсаторов с двойным электрическим слоем разработчики аппаратуры были вынуждены использовать в качестве источников тока с требуемой энергией и мощностью батареи аккумуляторов с избыточной энергией или батареи конденсаторов с избыточной мощностью, а также мириться с неизбежным увеличением габаритов и массы разрабатываемой аппаратуры.

Исследованиями, разработками, производством и проблемами использования конденсаторов с двойным электрическим слоем в настоящее время заняты десятки фирм и университетов [16–28]. Серийные и опытные образцы конденсаторов с двойным электрическим слоем различных фирм (Maxwell, EPCOS, Elna, NEC и т. д.) способны практически полностью перекрыть диапазон по удельной энергии и удельной мощности между аккумуляторами и электролитическими конденсаторами, а в некоторых случаях даже конкурировать с ними в приграничных областях.

Конкурентоспособность конденсаторов с двойным электрическим слоем в таких случаях определяется следующими факторами:

- большое количество циклов в режиме «зарядка-разрядка»;
- надежность и долговечность;

- широкий интервал рабочих температур;
- экологическая безопасность производства и использования.

Активное противодействие «экспансии» конденсаторов с двойным электрическим слоем в последнее время оказывают литий-ионные аккумуляторы. Исследования и разработки микропористых электродов для литий-ионных аккумуляторов позволяют увеличивать удельную мощность этих изделий до уровня удельной мощности конденсаторов с двойным электрическим слоем и, благодаря их высокой удельной энергоемкости, успешно конкурировать с последними, когда не требуется слишком большое количество циклов в режиме «зарядка-разрядка».

Конкуренция между конденсаторами с двойным электрическим слоем и оксидно-электролитическими конденсаторами возможна в перспективе [29], при условии снижения рабочих напряжений в электронной технике до 1–1,5 В. Использование оксидно-электролитических конденсаторов при напряжениях до 1,5 В проблематично, так как оксидные диэлектрики формируются при напряжениях выше 1,5 В, а при низких напряжениях расформовываются при эксплуатации.

Уникальное сочетание удельной энергии, удельной мощности и большого количества циклов в режиме «зарядка-разрядка» в конденсаторах с двойным электрическим слоем весьма эффективно используется в новых разработках электромобилей [30–35]. Основной источник электроэнергии в этих изделиях, обеспечивающий требуемую величину пробега, — батарея топливных элементов или аккумуляторов — защищен от перегрузок модулем из последовательно соединенных конденсаторов с двойным электрическим слоем. Благодаря этому модулю удается решить сразу несколько проблем:

- проблему старта и ускорения в течение нескольких секунд до необходимой скорости движения;
- проблему рекуперации электроэнергии при торможении;
- проблему увеличения срока службы основного источника электроэнергии.

В зарубежной литературе рассмотрены варианты применения конденсаторов с двойным электрическим слоем в военной и аэрокосмической промышленности и требования к ним [36–41], а также проблемы рынка конденсаторов с двойным электрическим слоем [42–44].

Разработки и производство ионисторов в ОАО «НИИ Гириконд»

В ОАО «НИИ Гириконд» разрабатываются и выпускаются ионисторы двух типов:

- ионисторы с твердым электролитом $RbAg_4I_5$ («гибридные» ионисторы с электрохимической реакцией на катоде $Ag^+ + e \leftrightarrow Ag^0$);

Таблица 2. Параметры и характеристики ионисторов K58-1, K58-2 (разработка 1985 года)

| Параметры и характеристики ионисторов | Ионистор K58-1 Категория качества ВП | Ионистор K58-2 Приемка ОТК |
|---|--|---|
| Технические условия | ОЖО.464.246 ТУ | АДПК.673623.005 ТУ |
| Условное обозначение при заказе | Ионистор K58-1 – 6,3 В – 1,0 Ф ОЖО.464.246 ТУ | Ионистор K58-2 – 0,5 В – 1,5 Ф АДПК.673623.005 ТУ |
| Особенности конструкции, климатическое исполнение | Защищенные, полярные, в цилиндрическом корпусе, исполнение В | Уплотненные, полярные, «пуговичного» типа, УХЛ 2.1 ГОСТ 15150 |
| Номинальные значения напряжения и емкости | а) 6,3 В – 0,1 Ф + 80/– 20% б) 6,3 В – 1,0 Ф + 80/– 20% | а) 0,5 В – 1,5 Ф + 80/– 20% б) 0,5 В – 15 Ф + 80/– 20% |
| Допускаемый ток зарядки и разряд | а) не более 10 мА б) не более 30 мА | а) не более 10 мА б) не более 30 мА |
| Допускаемое напряжение зарядки и разрядки | Узар не более 1,0 мВ Уразр не менее 2 В | Узар не более 1,0 мВ Уразр не менее 0,0 В |
| Габаритные размеры | а) D = 20 мм; H = 48 мм б) D = 28 мм; H = 71 мм | а) D = 14 мм; H = 2,1 мм б) D = 23 мм; H = 3,4 мм |
| Интервал рабочих температур | от –60 до +85 °С | от –60 до +85 °С |
| Наработка на отказ | 10 000 час; 5000 циклов в пределах срока службы 12 лет | 10 000 час; 5000 циклов в пределах срока службы 12 лет |
| Срок сохранности | 12 лет | 6 лет |

- ионисторы с органическими электролитами («идеальные» ионисторы с высоким рабочим напряжением и большим количеством циклов в режиме «зарядка-разрядка»).

Ионисторы с твердым электролитом RbAg₄I₅

Ионисторы с твердым электролитом RbAg₄I₅ имеют ограниченное количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» и низкое рабочее напряжение (0,4–0,6 В), так как количество циклов ограничивается особенностями протекания электрохимического процесса на катоде, а рабочее напряжение — потенциалом выделения йода (2I⁻ – 2e⁻ ↔ I₂) на аноде (<0,67 В).

Количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» (от 10² до 10⁶) определяется, главным образом, величинами токов зарядки и разрядки, а рабочее напряжение рассчитывают в зависимости от максимальной рабочей температуры и требуемой величины наработки.

Для получения более высоких рабочих напряжений ионисторы подбирают по параметрам и соединяют последовательно в пакеты; пакеты помещают в общий корпус и изолируют от внешней среды.

Конкурентоспособность ионисторов с твердым электролитом RbAg₄I₅, несмотря на низкое рабочее напряжение и высокую цену, определяется совокупностью следующих параметров:

- широкий интервал рабочих температур — от –60 до +125 °С (интервал может быть расширен до +200 °С);
- высокая стойкость к воздействиям механических факторов — сборка ионисторов осуществляется при усилиях пресования порядка 1000 кг/см², поэтому эти изделия могут выдерживать удары с ускорением до 10² g;
- высокая стойкость к воздействиям специальных факторов (этот тип ионисторов сохраняет заряд в процессе и после воздействия специальных факторов);
- сверхнизкие токи саморазряда — порядка 10⁻¹¹ А при 20 °С; за 10 лет хранения ионисторы теряют 25–30% накопленного заряда.

Ионисторы с твердым электролитом используются преимущественно в качестве резервных источников тока, не требующих обслуживания или замены в течение всего срока службы изделия или устройства.

Параметры и характеристики ионисторов K58-1, K58-2 и K58-13, предназначенных для этой цели, приведены в таблицах 2 и 3.

В случаях, когда не требуется большое количество циклов в режиме «зарядка-разрядка», ионисторы на основе твердого электролита можно также использовать в исполнительных устройствах целевого назначения, заряжая и разряжая их относительно большими токами (например, ионистор K58-12 – 7,5 В – 0,1 Ф + 50% АЖЯР. 673623.001ТУ).

Ионисторы с органическими электролитами

Ионисторы с органическими электролитами «идеального» типа характеризуются отсутствием электрохимических реакций на электродах при напряжениях до 2,7 В, вследствие чего они могут заряжаться и разряжаться большими токами и выдерживать в таком режиме большое количество циклов. Изделия этого типа не требуют обслуживания и замены в течение всего срока службы аппаратуры, чем весьма выгодно отличаются от перезаряжаемых источников тока всех

Таблица 3. Параметры и характеристики ионисторов K58-13

| Параметры и характеристики ионисторов | Ионистор K58-13 Категория качества ОТК |
|---|---|
| Технические условия | (Разработка, поставка образцов) |
| Условное обозначение при заказе | Ионистор K58-13 – 5,5 В – 0,033 Ф Опытный образец |
| Особенности конструкции, климатическое исполнение | Защищенные, полярные, в цилиндрическом корпусе, УХЛ 2.1 ГОСТ 15150 |
| Номинальные значения напряжения и емкости | а) 1,2 В – 0,1 Ф; б) 2,4 В – 0,068 Ф; в) 5,5 В – 0,033 Ф; г) 6,3 В – 0,022 Ф; д) 8 В – 0,01 Ф |
| Допускаемый ток зарядки и разряд | Не более 1 мА (при больших токах количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» снижается) |
| Допускаемое напряжение зарядки и разрядки | Узар не более 1,0 мВ Уразр не менее 0,2 мВ |
| Габаритные размеры | а) D = 9,5 мм; H = 5 мм; б) D = 9,5 мм; H = 10 мм; в) D = 9,5 мм; H = 18 мм; г) D = 9,5 мм; H = 22 мм; д) D = 9,5 мм; H = 28 мм |
| Интервал рабочих температур | от –60 до + 125 °С |
| Наработка на отказ | 10 000 час; 5000 циклов в пределах срока службы 12 лет |
| Срок сохранности | 12 лет |

других типов, в том числе и от «гибридных» и «псевдоконденсаторов».

По величине удельной энергии, удельной мощности и наработке на отказ (до 100 000 часов и до 500 000 циклов в пределах срока службы 12–20 лет) ионисторы этого типа занимают доминирующее положение на рынке конденсаторов с двойным электрическим слоем.

В ОАО «НИИ Гириконд» разрабатываются и выпускаются три типа ионисторов с органическими электролитами:

- маломощные ионисторы K58-4, 5, 6, 6А уплотненные, полярные, «пуговичного» типа (табл. 4);
- ионисторы средней мощности типа K58-15, 16, 17, 18 герметичные, полярные (табл. 5, 6);
- высокоемкие ионисторы (100–5000 Ф) с высокой удельной энергией и мощностью (разработка, поставка образцов). В рамках научно-исследовательского этапа разрабатываются и поставляются макетные образцы ионисторов следующих номиналов: 2,3 В – 100 Ф; 2,3 В – 220 Ф; 2,3 В – 470 Ф; 2,3 В – 1000 Ф; 2,3 В – 1500 Ф; 2,3 В – 3300 Ф; 2,3 В – 5000 Ф.

Таблица 4. Параметры и характеристики ионисторов K58-4, K58-5, K58-6, K58-6А

| Параметры и характеристики ионисторов | Ионисторы K58-4 (а, б), K58-5 (в, г); приемка ОТК | Ионисторы K58-6 (а, б), K58-6А (в, г); приемка ОТК |
|---|--|---|
| Технические условия | АДПК.673623.004 ТУ | |
| Пример условного обозначения при заказе: | Ионистор K58-4 – 2,5 В – 2,2 Ф АДПК.673623.004 ТУ | Ионистор K58-6 – 6,3 В – 1,0 Ф АДПК.673623.004 ТУ |
| Особенности конструкции, климатическое исполнение | Уплотненные, полярные, «пуговичного» типа, УХЛ 2.1, ГОСТ 15150 | Уплотненные, полярные, цилиндрического типа, УХЛ 2.1, ГОСТ 15150 |
| Номинальные значения напряжения и емкости | а) 2,5 В – 1,5 Ф; 2,5 В – 2,2 Ф б) 2,5 В – 3,3 Ф; 2,5 В – 4,7 Ф в) 2,5 В – 1,5 Ф; 2,5 В – 2,2 Ф г) 2,5 В – 3,3 Ф; 2,5 В – 4,7 Ф | а) 6,3 В – 0,47 Ф; 6,3 В – 0,68 Ф б) 6,3 В – 1,0 Ф; 6,3 В – 1,5 Ф в) 5,5 В – 0,68 Ф; 5,5 В – 1,0 Ф г) 5,5 В – 1,5 Ф; 5,5 В – 2,2 Ф |
| Допускаемый ток зарядки и разрядки | а, в) не более 100 мА б, г) не более 500 мА | а, в) не более 100 мА б, г) не более 500 мА |
| Допускаемое напряжение зарядки и разрядки | Узар не более 1,0 мВ Уразр не менее 0,0 В | Узар не более 1,0 мВ Уразр не менее 1,0 В |
| Габаритные размеры | а, в) D = 18,5 мм; H = 2,5 мм; б, г) D = 24,5 мм; H = 2,5 мм | а) D = 21; H = 11 мм; б) D = 27,5; H = 11 мм; в) D = 21; H = 9 мм; г) D = 27,5; H = 9 мм |
| Интервал рабочих температур | от –25 до +70 °С | |
| Наработка на отказ | 40 000 час; 500 000 циклов в пределах срока службы 6 лет | |
| Срок сохраняемости | 6 лет | |

Таблица 5. Параметры и характеристики ионисторов K58-15 и K58-16

| Параметры и характеристики ионисторов | Ионистор K58-15 Категория качества ВП | Ионистор K58-16 Приемка ОТК |
|---|--|---|
| Технические условия | АЖЯР.673623.002ТУ | АДПК.673623.006 ТУ |
| Пример условного обозначения при заказе | Ионистор K58-15 – 5,5 В – 10 Ф АЖЯР.673623.002ТУ | Ионистор K58-16 – 2,3 В – 33 Ф АДПК.673623.006 ТУ |
| Особенности конструкции, климатическое исполнение | Прямоугольный, полярный, УХЛ 2.1, ГОСТ 15150 | Прямоугольный, полярный, исполнение В, ГОСТ 15150-69 |
| Номинальные значения напряжения и емкости | 5,5 В – 10 Ф | а) 2,3 В – 33 Ф б) 2,3 В – 47 Ф |
| Внутреннее сопротивление | ≤0,2 Ом | а) 0,07 Ом б) 0,05 Ом |
| Допускаемый ток зарядки и разрядки | не более 1,2 А | а) не более 7 А б) не более 8 А |
| Допускаемое напряжение зарядки и разрядки | Узар не более Uном Уразр не менее 0,8 В | Узар не более Uном Уразр не менее 0,0 Uном |
| Габаритные размеры | 45×20×40 мм | 14×18×40 мм |
| Интервал рабочих температур | от –50 до +50 °С | от –50 до +70 °С |
| Наработка на отказ | 15 000 циклов в типовом режиме эксплуатации | 100 000 час; 500 000 циклов в пределах срока службы 12 лет |
| Срок сохранности | 12 лет | 20 лет |

Таблица 6. Параметры и характеристики ионисторов K58-17 и K58-18 (разработка, поставка образцов)

| Параметры и характеристики ионисторов | Ионистор K58-17 Приемка ОТК | Ионистор K58-18 Категория качества ВП |
|---|--|---|
| Технические условия | (Разработка, поставка образцов) | |
| Пример условного обозначения при заказе: | Ионистор K58-17 – 5,5 В – 15 Ф макетный образец | Ионистор K58-18 – 4,0 В – 47 Ф макетный образец |
| Особенности конструкции, климатическое исполнение | Прямоугольный, полярный; исполнение В, ГОСТ 15150-69 | Прямоугольный, полярный; УХЛ 2.1, ГОСТ 15150 |
| Номинальные значения напряжения и емкости | а) 4,0 В – 22 Ф; б) 5,5 В – 10 Ф; в) 5,5 В – 15 Ф; г) 6,3 В – 10 Ф; д) 6,3 В – 15 Ф; е) 10 В – 10 Ф; ж) 12 В – 6,8 Ф | 4,0 В–47 Ф |
| Внутреннее сопротивление | 0,1–0,3 Ом | Не более 0,1 Ом |
| Допускаемый ток зарядки и разрядки | не более 8 А | не более 3 А |
| Допускаемое напряжение зарядки и разрядки | Узар не более Uном Уразр не менее 0,1 Uном | Узар не более Uном Уразр не менее 0,1 Uном |
| Габаритные размеры, мм | а) 20×30×40; б, в, г, д) 45×20×40; е) 20×72×40; ж) 20×85×40 | 20×60×40 |
| Интервал рабочих температур | от –50 до +70 °С | от –50 до +50 °С |
| Наработка на отказ | 100 000 час; 500 000 циклов в пределах срока службы 20 лет | 15 000 час; 30 000 циклов в пределах срока службы 12 лет |
| Срок сохраняемости | 20 лет | 12 лет |

Закключение

- Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы) и новые типы псевдоконденсаторов и литий-ионных аккумуляторов способны перекрыть практически весь диапазон по величине удельной энергии и удельной мощности, ранее разделявший традиционные типы энергонакопительных конденсаторов и аккумуляторов. Использование таких источников тока позволяет оптимизировать габариты и массу радиоэлектронной аппаратуры, а также решать проблемы в области создания электромобилей нового поколения.
- Ионисторы с твердым электролитом $RbAg_4I_5$ имеют широкий интервал рабочих температур, сверхвысокую стойкость к воздействиям механическим и специальным факторам и не имеют альтернативы в случае использования в жестких условиях эксплуатации.
- Конденсаторы с двойным электрическим слоем на основе органических электролитов в герметичном исполнении могут заряжаться и разряжаться большими токами и выдерживать в таком режиме большое количество циклов. Изделия этого типа не требуют обслуживания и замены в течение всего срока службы аппаратуры и находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. ■

Литература

- Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. М.: Госэнергоиздат. 1959.
- Химические источники тока. Справочник. Под редакцией Н. В. Коровина и А. М. Скундина. М.: Издательство МЭИ. 2003.
- В. Е. Conway. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. Kuwer-Plenum Publ. Co. N-Y.: 1999.
- A. Burke. Ultracapacitor Technology: Present and Future. ACWS 2003.
- ОСТ 11074.008. Конденсаторы постоянной емкости. Классификация и система условных обозначений.

- Свидетельство № 103073 на товарный знак «Ионистор®» от 05.03.91.
- M. Reimerink. Carbons Making Large DLCs Economically Feasible. ACWS 2003.
- C. Segal & Kiyoto Otsuka. Activated Carbons: Performance in Electric Double Layer Capacitors. ACWS 2003.
- Steven Dietz. Development and Production of Inexpensive Carbons for Double Layer Capacitors. 14th ISDL.
- E. G. Lundquist, G. R. Parker. Engineered Carbons for Ultracapacitors Applications 14th ISDL.
- Joel Shindall et al. Nanotubes Enhanced Ultracapacitors. 14th ISDL.
- A. Burke. Key Issues for the Implementation and Marketing of Ultracapacitors in Vehicle Applications. 14th ISDL.
- I. Varakin. High Temperature ECs. ACWS 2003.
- B. E. Conway. Pseudocapacitance; its Nature and Relation to Double Layer Capacitance of Electrochemical Capacitors. 14th ISDL.
- Inho Kim. Ultracaps: Between EDLS and Pseudocapacitors. ACWS 2003.
- Bobby Maher. Ultracapacitors — The Revolutionary Component for Power-Intensive Electronic Products. ACWS 2003.
- Y. Saiki. New EDLC Developments for Portable Consumer Applications After 25 Years in the Business. ACWS 2004.
- S. Joshi. Advanced UltraCap Modules for Power Electronics. ACWS 2004.
- B. Rawal. BestCap — A New Generation of Pulse Double Layer Capacitors. ACWS 2004.
- A. Beliakov. Starting of Locomotive Diesel Engines Using ECs. ACWS 2003.
- Michio Okamura. Production Status of Nanogate Capacitors and Integrated Electronics, Part 1, 2. 14th ISDL.
- Mark Juzkow. Ultracapacitor Development at EaglePicher. 14th ISDL.
- John R. Miller. Reliability Improvement of Large Electrochemical Capacitor Systems. 14th ISDL.
- N. Marincic. High Temperature Electrochemical Capacitors with Reduced Leakage Rate. 14th ISDL.
- V. Koch. Electrochemical Double Layer Capacitors for High Temperature Applications. 14th ISDL.

- Andrew Kular. The ECOSOL Power Module (ERM): A novel energy storage platform for portable electronic devices. 14th ISDL.
- S. Menocal. An Asymmetric Hybrid Supercapacitor for High Specific Energy Applications. ACWS 2003.
- T. Geist. A 2000 V Ultracapacitor for Transmission Stability. ACWS 2004.
- Кузнецов В. П. и др. Пути и перспективы развития и применения конденсаторов с двойным электрическим слоем (ионисторов) // Электронная техника, серия 5. Радиодетали и компоненты. 1991. Вып. 4 (85).
- M. Verbrugge. Supercapacitors and Automotive Applications. ACWS 2003.
- A. Schwake, C. J. Weber. EC-Project «Supercar»: Ultracapacitors for Mild Hybrid Application. 14th ISDL.
- J. M. Miller and M. Everett. Ultracapacitor Augmentation of the 14V Vehicle Electrical System to Support Auxiliary 42V Subsystem. 14th ISDL.
- M. Zolot. EDLS Modeling and Integration for Hybrid Electric Vehicles. 14th ISDL.
- R. Smith. Fuel Cells and Ultracapacitors. ACWS 2004.
- T. Key. Ultracapacitors for Dynamic Correction of Power Quality Problems. ACWS 2003.
- F. Krestik. US Army Vehicle Applications for Electrochemical Capacitors. ACWS 2003.
- C. Perazzola. Air Forces Use of Ultracapacitors for the Future Hydrogen Economy. ACWS 2003.
- A. Nickens. Pulse Power Requirements for Future Navy Warships. ACWS 2003.
- P. Smith. High Pulse Power Initiative within the US Navy. 14th ISDL.
- N. Clark. Supercapacitors for Electric Storage. ACWS 2003.
- H. Barde. Supercapacitors: Applications and Requirements. Proceedings of the European Space Components Conference 2000 (ESA SP-439, June 2000).
- J. Dittmer. The World Market and Opportunities for Electrochemical Capacitors. ACWS 2003.
- M. Hendrie. EC Capacitors: Market Dynamics and Challenges for Growth. ACWS 2003.
- D. Zogbi. Global Market Intelligence on EDLC Capacitors-2004. ACWS 2004.