

Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры

Алексей ПАНКРАШКИН
Alexey.Pankrashkin@macrogroup.ru

При проектировании современных электронных приборов и устройств перед разработчиком довольно часто встает вопрос резервного или автономного питания своего устройства. Как правило, в зависимости от характера потребления электроэнергии и задач, в этом случае используют электролитические конденсаторы, аккумуляторы или батареи. Однако использование вышеприведенных устройств или их комбинации, в силу специфики каждого устройства, не всегда в полной мере позволяет решить поставленную задачу.

При реализации автономного питания довольно часто также необходимо реализовать начальные большие кратковременные токи (например, ручной электроинструмент с аккумуляторным питанием), и обойтись только аккумулятором не представляется возможным. Тогда используют комбинацию аккумулятор (или батарея)/электролитический конденсатор. Аккумулятор или батарея реализуют долговременное энергонезависимое питание, а электролитический конденсатор — кратковременный большой ток в нагрузку. Относительно недавно появился новый класс приборов — ионисторы. В отличие от батарей, аккумуляторов или электролитических конденсаторов, где используются необратимые, обратимые химические реакции или классический заряд конденсатора соответственно, в ионисторах применяется механизм образования «двойного электрического слоя». Ионисторы обладают рядом преимуществ по сравнению с вышеприведенными устройствами: это широкий температурный диапазон, большая

емкость, высокое сопротивление изоляции (низкие токи утечки), длительный срок службы, отсутствие необходимости контроля процесса зарядки, до нескольких десятков тысяч циклов заряд/разряд.

Сегодня ионисторы выпускаются многими производителями, как отечественными, так и зарубежными. В данной статье использованы материалы компании Panasonic, и на примере ионисторов данной компании, получивших фирменное название Gold Capacitors (Gold Cap), мы рассмотрим их физику и принцип работы, возможные варианты конструкции и эквивалентной схемы, характеристики и параметры, а также рекомендации по возможному применению.

Физико-химические основы работы ионистора

Известно, что обычные конденсаторы имеют многослойный или монокристаллический диэлектрик между двумя обкладками. В алюминиевом электролитическом конденсаторе, например,

в качестве диэлектрического слоя используется пленка оксида алюминия, а в танталовом конденсаторе — пленка оксида тантала. Ионистор же не имеет диэлектрического слоя, в нем применяется физический механизм образования двойного электрического слоя, который работает аналогично заряженному диэлектрику. Процесс зарядки/разрядки происходит в слое ионов, сформированном на поверхностях положительного и отрицательного электродов, к примеру, из активированного угля (рис. 1). Под действием приложенного напряжения анионы и катионы движутся к соответствующему электроду, образуя, таким образом, с зарядом электрода двойной электрический слой. Вследствие этого и появилось название «конденсатор с двойным электрическим слоем» (electric double layer capacitor — EDLC).

Принцип работы и возможные конструкции

Существует два типа электролитов, которые чаще всего используются сейчас производителями ионисторов: водные (водорастворимые) и органические (водонерастворимые). Безводный электролит позволяет прикладывать напряжение до 3 В к ячейке ионистора, что в два раза выше по сравнению с водорастворимым электролитом, для которого это напряжение не превышает 1,5 В. В данном случае двойной электрический слой работает как изолирующий и при приложении постоянного внешнего напряжения не позволяет протекать сквозному току. При конкретном уровне напряжения определенной полярности за счет электрохимических процессов начнет протекать ток. Величина этого напряжения назва-

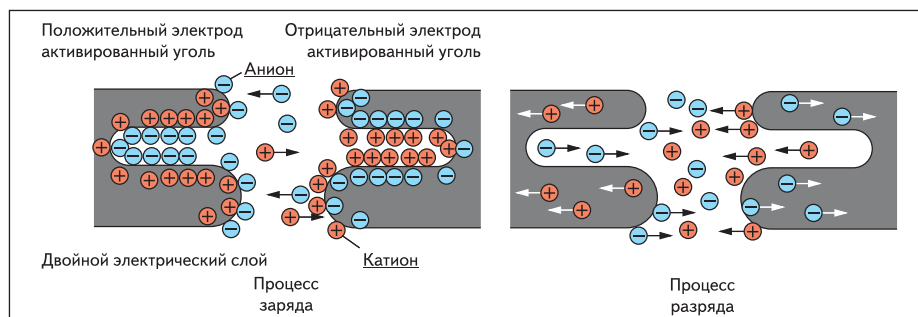


Рис. 1. Образование двойного электрического слоя на поверхностях положительного и отрицательного электродов, к примеру, из активированного угля

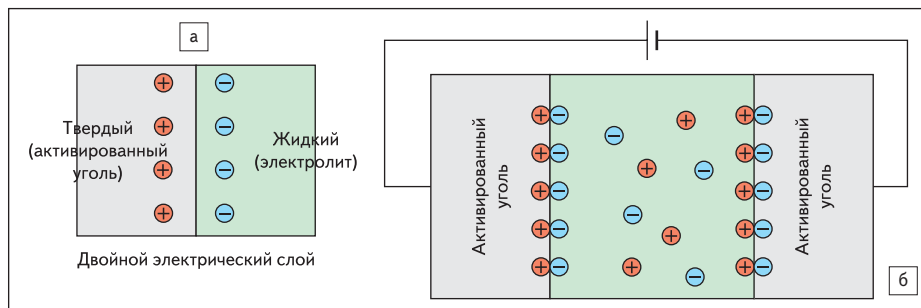


Рис. 2. Образование двойного электрического слоя (а) и увеличение заряда при приложении напряжения (б)

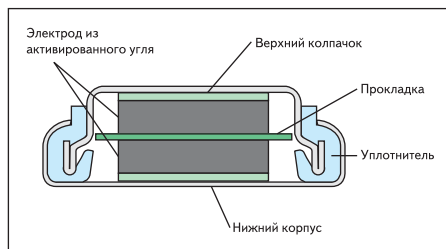


Рис. 3. Одна из возможных конструкций ионистора в поперечном разрезе на примере EN серии Panasonic

на «напряжением разложения» или «напряжением электрохимического распада электролита». Дальнейшее увеличение напряжения заставит электролит разлагаться более интенсивно, приводя к появлению дополнительного тока, и ионистор выйдет из строя. Поэтому при зарядке приложенное к ионистору напряжение ограничено напряжением разложения, вследствие чего довольно часто ионисторы соединяют последовательно.

Как было сказано выше, положительные и отрицательные заряды формируются на поверхности электрода, образуя, таким образом, с зарядом электрода двойной электрический слой. Границей раздела в этом случае будет двойной электрический слой (рис. 2а). Эта область увеличивается при приложении более высокого напряжения (рис. 2б), и накапливаемый заряд увеличивается. Толщина двойного электрического слоя очень мала и сопоставима с размером молекулы, то есть около 5–10 нм. В качестве электродов, например, в ионисторах Panasonic используется активированный уголь (в виде мелкодисперсной фракции), изготовленный по специальной порошковой технологии, и органический электролит. Электролит проникает между частицами активированного угля, и электрод, таким образом, «пропитан» электролитом. Общую емкость ионистора можно представить, как большое количество малых конденсаторов, где каждая частица из активированного угля — своеобразный электрод для малого конденсатора с емкостью, обусловленной двойным электрическим слоем.

Общая емкость ионистора может быть представлена как:

$$c = S/d, \quad (1)$$

где d — толщина двойного электрического слоя 5–10 нм, S — общая площадь поверхности электрода из активированного угля.

Поскольку электрод ионистора представляет собой совокупность огромного количества частиц активированного угля, он имеет очень большую «развитую» площадь поверхности, приблизительно до 2500–3000 см²/г. Это позволяет получить емкость до нескольких десятков фарад.

На рис. 3 представлена одна из возможных конструкций ионистора в поперечном раз-

резе на примере EN серии Panasonic. Между электродами для предотвращения проникновения ионов расположен «сепаратор» с хорошими изоляционными свойствами, что позволяет не допустить короткого замыкания между электродами.

Эквивалентная схема

Поскольку двойной электрический слой сформирован на поверхности активированного угля, который находится в контакте с электролитом, для ионисторов может быть применена эквивалентная схема с использованием условных конденсаторов (рис. 4). Каждый малый конденсатор на основе структуры частица активированного угля/электролит будет обладать емкостью двойного электрического слоя — C_n . Значения сопротивлений заряда R_{sn} в процессе заряда и сопротивление нескомпенсированных ионов

R_{in} могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от расстояния между «токоведущими» электродами, скоростью передвижения ионов, контактного сопротивления между частицами активированного угля и других параметров.

Эквивалентная схема ионистора на основе параллельного соединения сопротивлений и емкостей малых конденсаторов приведена на рис. 5а. R_1, R_2 и R_n — сопротивления изоляции (внутреннее сопротивление частиц активированного угля), C_1, C_2 и C_n — соответствующая емкость двойного электрического слоя для сопротивлений R_1, R_2 и R_n .

Если приложить напряжение (V) к эквивалентной схеме, приведенной на рис. 5б, которая учитывает сопротивление электродов и сепаратора, то зарядный ток (i) можно описать согласно:

$$i = \frac{V}{R} \exp\left(\frac{-t}{CR}\right). \quad (2)$$

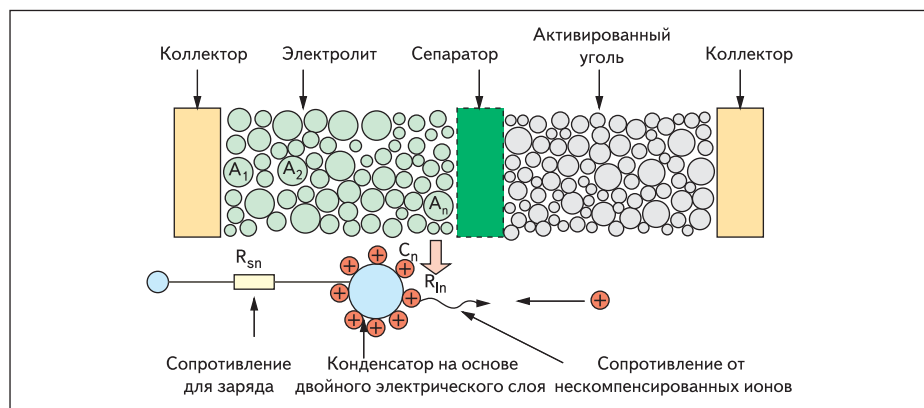


Рис. 4. Схематическое изображение многослойной структуры активированный уголь/электролит

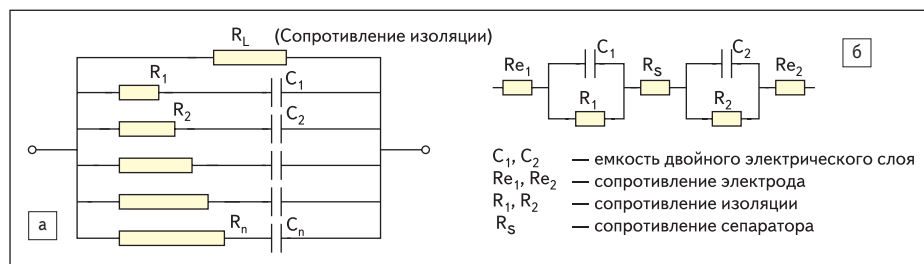


Рис. 5. Варианты эквивалентной схемы ионистора на основе малых конденсаторов двойного электрического слоя от каждой частицы активированного угля и сопротивления изоляции (сопротивления частиц активированного угля) (а) и с учетом сопротивлений электродов и сепаратора (б)

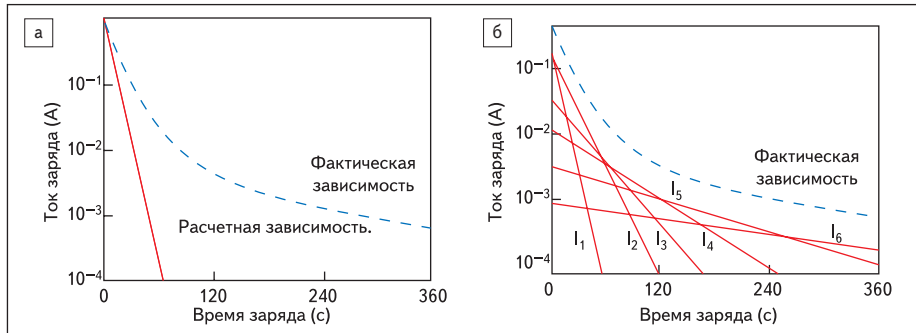


Рис. 6. Зависимость зарядного тока от времени заряда: а) расчетная и реальная зависимости; б) как сумма токов через малые конденсаторы

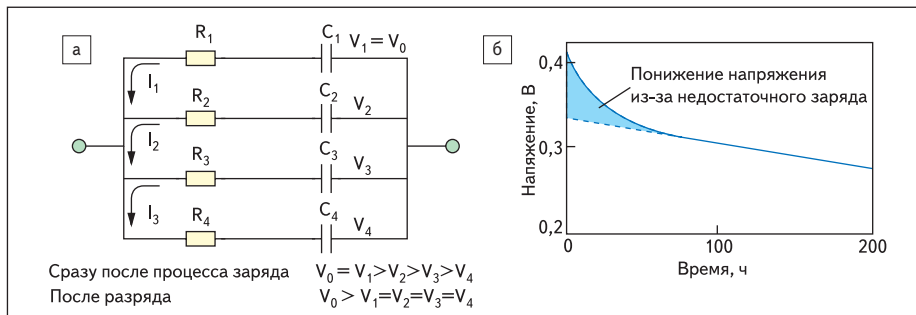


Рис. 7. Эквивалентная схема со значениями напряжений сразу после процесса заряда и после разряда (а) и понижение напряжения в начале работы вследствие недостаточного заряда малых конденсаторов (б)

Необходимо отметить, что при уменьшении величины зарядного тока (i) время заряда увеличится. Зарядный ток, согласно уравнению (2), графически будет представлен как прямая линия. Однако фактически кривая зарядного тока носит экспоненциальный характер (рис. 6а, б). Ток (i) в пределах ионистора может быть представлен как сумма токов, протекающих через каждый из малых конденсаторов (рис. 6б, 7а). Также необходимо отметить, что, если значение постоянной времени $C \times R$ мало, время зарядки тоже будет мало, и наоборот, если значение $C \times R$ большое, время зарядки будет большое. То есть если время зарядки ограничено несколькими минутами или источник заряда ограничен, ионистор не может достаточно зарядиться, чтобы запасти заданную энергию в течение необходимого времени.

Электрические, эксплуатационные и надежные параметры ионисторов

Емкость

При аналогичных условиях эксплуатации и тестировании емкость ионистора подобна эффективной емкости батареи. Как было сказано ранее, ионистор можно представить в виде эквивалентной схемы из малых конденсаторов, имеющих различные значения сопротивления. Если начальное зарядное напряжение ниже напряжения полного заряда (V_0), то в начале измерения емкости после снятия зарядного напряжения напряжение

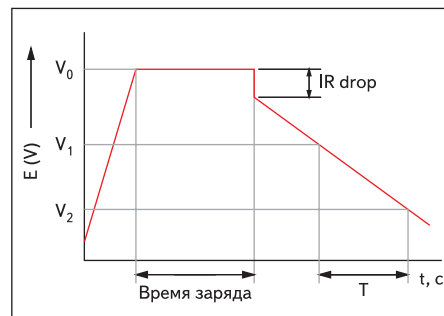


Рис. 8. Зависимость напряжения для ионистора от времени

на ионисторе упадет вниз (рис. 8). Это связано с наличием не полностью заряженных малых конденсаторов с большим внутренним сопротивлением. Однако, увеличивая время зарядки, эти малые конденсаторы с большим внутренним сопротивлением зарядятся, что приведет к увеличению измеренной емкости.

Емкость ионистора может быть оценена следующим образом:

$$C = \frac{I \times t}{(V_1 - V_2)}, \quad (3)$$

где C — электростатическая емкость (Ф), I — тестовый ток (А), $V_1 - V_2$ — тестовый диапазон напряжений, (В) t — время (с). Емкость, конечно же, зависит от тока. Если ток разряда большой или конденсатор разряжался в течение длительного периода времени, результирующая емкость будет мала. И наоборот,

если ток разряда мал или конденсатор разряжался в течение короткого периода времени, измеренная электростатическая емкость будет большая. Поэтому, чтобы иметь воспроизводимые измерения, используют стандартный ток разряда 1 мА/Ф.

Внутреннее сопротивление

Внутреннее сопротивление ионистора, например, по сравнению с электролитическими конденсаторами, велико, поскольку эквивалентная схема ионистора состоит из соединений большого количества малых конденсаторов, имеющих различные значения внутреннего сопротивления. Обычно значения этих сопротивлений могут быть представлены для постоянного напряжения. Но, чтобы получить их истинное значение, необходимо использовать комплексное сопротивление Z (к примеру на 1 кГц). Если измерять ток от 30 до 60 мин после приложения номинального напряжения, он будет довольно большой, до 10 мкА, вследствие того, что этот ток является суммой зарядных токов, протекающих через малые конденсаторы. Так как чрезвычайно трудно определить токи утечки в ионисторах, их чаще всего не указывают в документации. Требуется минимум 10 часов, чтобы полностью зарядить ионистор так, чтобы появилась возможность оценить ток утечки.

Характеристика зарядки

Характеристика зарядки ионистора при условии некоторых допущений может быть представлена выражением (4):

$$V = V_0 (1 - \exp(-t/CR)). \quad (4)$$

На рис. 9а приведена зависимость напряжения на ионисторе Panasonic EECF5R5U104 от времени заряда при различном сопротивлении нагрузки. С увеличением сопротивления характеристика становится более пологая, а время зарядки увеличивается.

Время разряда для постоянного тока и постоянного сопротивления нагрузки при разряде приведены в выражениях (5) и (6) соответственно:

$$t = \frac{C \times (V_0 - V_1)}{I}, \quad (5)$$

$$t = -C \times R \times \ln(V_1/V_0), \quad (6)$$

где: t — время, C — емкость, V_0 — внутреннее напряжение, V_1 — напряжение после t (с), I — ток нагрузки, R — сопротивление нагрузки.

На рис. 9б приведена зависимость напряжения ионистора Panasonic EECF5R5U104 от времени разряда при различном времени процесса зарядки. Видно, что, например, при изменении времени процесса заряда с одного часа до 100 часов, напряжение фактически меняется с 2,5, до 2,8 В, то есть процесс зарядки ионистора может быть очень быстрым.

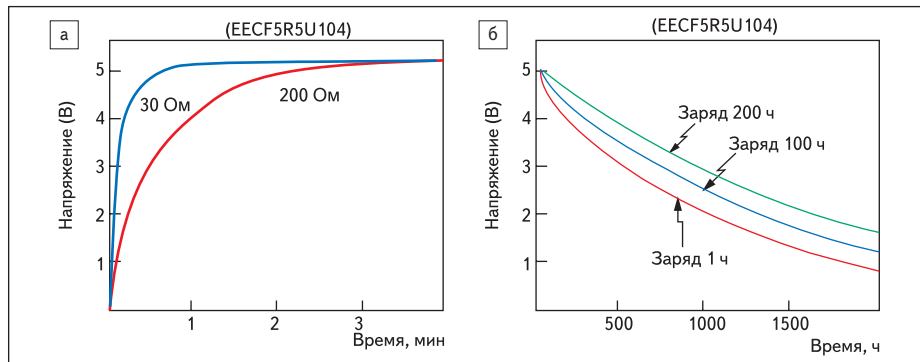


Рис. 9. Зависимость напряжения ионистора от времени заряда при различном сопротивлении (а) и времени разряда при различном времени заряда (б)

Характеристика разряда и саморазряда

Характеристика разряда ионистора с учетом (3) может быть представлена следующим образом:

$$t = C \times \frac{V_1 - V_2}{I} \quad (7)$$

Характеристика саморазряда ионистора может быть представлена следующим образом:

$$V = V_0 \times \exp\left(\frac{-t}{CR_L}\right) \quad (8)$$

где R_L — сопротивление изоляции (сумма сопротивлений частиц активированного угля электрода).

Предполагаемый срок эксплуатации, срок службы и $t_{back-up}$

Предполагаемый срок эксплуатации может быть оценен следующим образом:

$$\text{Предполагаемый срок эксплуатации} = \text{срок службы} \times \text{температурный фактор} \times \text{фактор напряжения} \times \text{фактор влажности}$$

Срок службы ионистора, как правило, ограничен временем $t_{back-up}$, которое задано по условиям эксплуатации. $t_{back-up}$ (Back-up time) — это время, когда ионистор работает как резервный источник питания между циклами заряда и разряда.

Например, оценим $t_{back-up}$ для F-типа ионистора Panasonic, EECF5R5H105 (5,5 В, 1,0 Ф), полный заряд при 5,0 В постоянного напряжения, разрядный ток 10 мкА. Температура при разряде -40°C , напряжение, до которого разрядится ионистор, — 2 В.

Параметр $t_{back-up}$ может быть рассчитан следующим образом:

$$t_{back-up} = CV/i = C \times (V_0 - ixR - V_1) / (I + i_L) \quad (9)$$

где C — емкость ионистора (Ф), i — ток в течение $t_{back-up}$ (А), i_L — ток утечки (А), R — внутреннее сопротивление ионистора (Ом на 1 кГц), V_1 — напряжение, до которого разрядится ионистор (В), V_0 — приложенное напряжение (В).

Тогда $C = 0,8 \text{ Ф}$ (1,0 Ф – 20%), $R = 50 \text{ Ом}$, $V_0 = 5 \text{ В}$, $V_1 = 2 \text{ В}$, $i = 10 \text{ мкА}$. Следовательно: $t_{back-up} = 0,8 \times (5 - 0,0005 \times 2) / (10 + 2 \times 10^{-6}) = 55 \text{ часов}$.

Этот расчет показывает, что время, которое ионистор будет работать при приведенных условиях как резервный источник питания, составляет около 55 часов.

Если мы возьмем, например, реальное изменение емкости в 30% при четырехкратном изменении внутреннего сопротивления, при 85°C и 5,5 В, то после 1000 часов эксплуатации $t_{back-up}$ изменится и составит около 38 часов.

Для учета температурного фактора для ионисторов можно использовать уравнение Аррениуса, согласно которому срок службы устройства удваивается при уменьшении температуры окружающей среды на каждые десять градусов.

$$2^{(85-40)/10} = 24,5 = 22,6$$

При изменении напряжения с 5,5 до 5 В фактор напряжения для изменения емкости

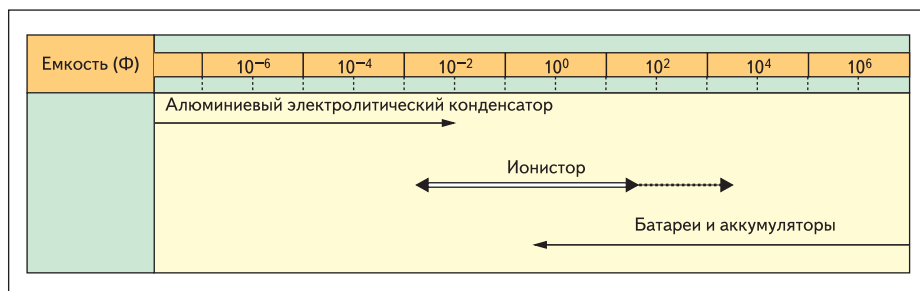


Рис. 10. Диапазон емкостей ионистора, алюминиевого электролитического конденсатора, аккумуляторов и батарей

составит 1,1. Таким образом, *предполагаемый срок эксплуатации* = *срок службы* × *температурный фактор* × *фактор напряжения* = 1000 (ч) × 22,6 × 1,1 = 24 800 (ч) = 2,8 года.

Приведенные оценки носят рекомендательный характер. При выборе ионистора, конечно, надо учитывать все необходимые условия и факторы.

Диапазон емкостей ионистора занимает промежуточное положение между емкостями алюминиевого электролитического конденсатора и аккумуляторами и батареями (рис. 10). Ионистор главным образом используется как резервное или автономное питание, а также как замена батарей или аккумуляторов.

Срок службы. Срок службы ионисторов очень большой. Фактически, когда ионистор находится в надлежащих условиях, он может работать столь же долго, как и само оборудование, в котором он используется.

Широкий рабочий температурный диапазон. Батареи обычно восприимчивы к перепадам температуры и имеют тенденцию терять энергию в процессе нагревания или при низких температурах, например, ниже 0°C . Некоторые ионисторы могут работать вплоть до промышленного температурного диапазона.

Нет необходимости в контроле заряда. Ni-Cd батареи выделяют тепло в процессе заряда или разряда, которое сокращает срок их службы, поэтому возникает необходимость в схеме контроля заряда и нагрузки. Ионисторы не имеют никакого ограничения по процессу заряда и разряда и не нуждаются в контроле процесса заряда.

Скорость заряда, повторный заряд/циклы разряда. Для ионисторов возможны быстрый заряд и большое количество циклов заряд/разряд (до нескольких десятков тысяч), поскольку в них не происходит никаких внутренних химических реакций, как, например,

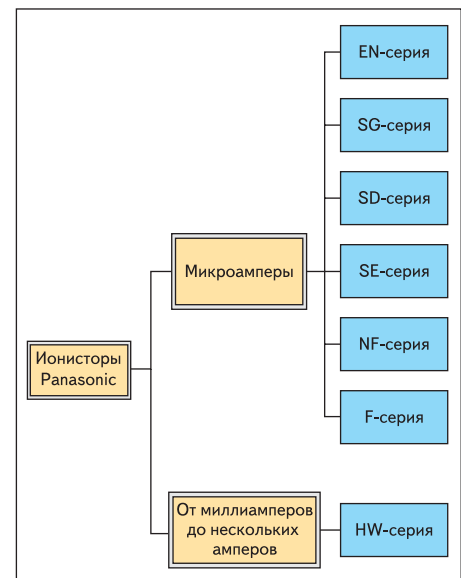


Рис. 11. Различные семейства ионисторов Panasonic

Таблица 1. Рекомендуемые серии для типичных применений

Применение	Рекомендуемая серия	Внешний вид
Мобильные телефоны	EN	
DSC	EN, SD	
DVD	SD, SG	
Цифровое ТВ	SD, SG, NF	
ПК, серверы	F	
Струйные принтеры	SD, SE, SG, NF	
Счетчики электроэнергии, газа и воды	F	
Светодиодное освещение с солнечными батареями, управление двигателями	HW	
Игрушки	EN	
FA, роботы, IPC	F	
Автомобильная электроника, память, жесткие диски	HW	

в батареях. Ионисторы идеально подходят для схем, в которых необходимы быстрые процессы заряда.

Экологическая чистота. В ионисторах Panasonic не используются никаких токсичных материалов типа свинца, кадмия или ртути. Ионисторы Panasonic удовлетворяют всем требованиям RoHS.

Типы и характеристики ионисторов Panasonic

Компания Panasonic предлагает широкий диапазон типов ионисторов в различных корпусах. Эти устройства могут отличаться по рабочему температурному диапазону, емкости, напряжению и току, а также по применению (рис. 11, табл. 1). В зависимости от тока, ионисторы можно условно разделить на слабо-, средне- и сильнотоочные (табл. 2, 3).

Таблица 2. Диапазон емкостей

Серия	Код емкости																		
	223	333	473	104	224	334	474	684	105	155	205	335	475	106	226	306	506	706	
EN 3,3 В					O*														
SG 5,5 В							O		O	O									
SD 5,5 В	O		O	O	O	O													
SE 5,5 В	O		O	O	O														
NF 5,5 В	O		O	O	O		O		O	O									
F 5,5 В		O	O	O			O	O	O										
HB 2,3 В									O			O	O	O	O	O	O	O	O*

Код емкости: 223 = 0,022 Ф, 104 = 0,1 Ф, 106 = 10 Ф *EN224 = 0,2 Ф = 2,1 В

Таблица 3. Диапазон токов

Серия	Максимум рабочего тока (разрядный ток)				
	0,047 Ф	от 0,1 до 0,33 Ф	от 0,47 до 1,5 Ф	от 3,3 до 4,7 Ф	от 10 до 50 Ф
SG, SD, SE, NF	200 мкА	300 мкА	1 мА	—	—
F	200 мкА	300 мкА	300 мкА	—	—
EL	—	300 мкА	1 мА	—	—
EN	—	10 мкА	—	—	—
HW	—	—	100 мА	300 мА	1 А

Ионисторы с небольшими токами, как правило, используются в схемах резервного питания, питания схем памяти, цифровых устройствах и т. д. Ионисторы с большими токами (например, HW-серия) используются в схемах управления электродвигателями, в автомобильной электронике и т. д.

Как говорилось ранее, процесс заряда ионистора с учетом некоторых допущений может быть описан выражением (4). На рис. 12а приведена характеристика заряда для иони-

стора EECF5R5U105 фирмы Panasonic при двух различных сопротивлениях. Поскольку зависимость экспоненциальна, фактически различия наблюдаются на начальном этапе зарядки, в течение 6–7 минут. На рис. 12б для этого же ионистора приведена характеристика саморазряда. Видно, что процесс заряда оптимален при времени заряда больше 24 часов, однако на процесс саморазряда время заряда влияет не сильно, поскольку внутреннее сопротивление ионистора в этом случае

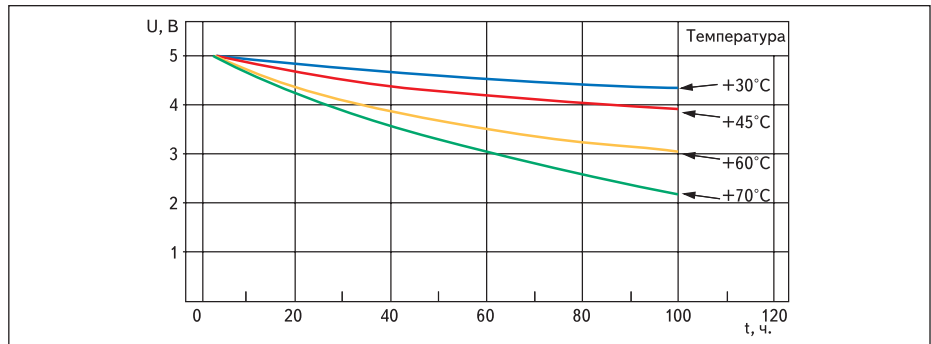


Рис. 13. Характеристика саморазряда в зависимости от температуры для EEC50HD104V (5,5 В, 0,1 Ф) Условия заряда: 5 В, 24 часа

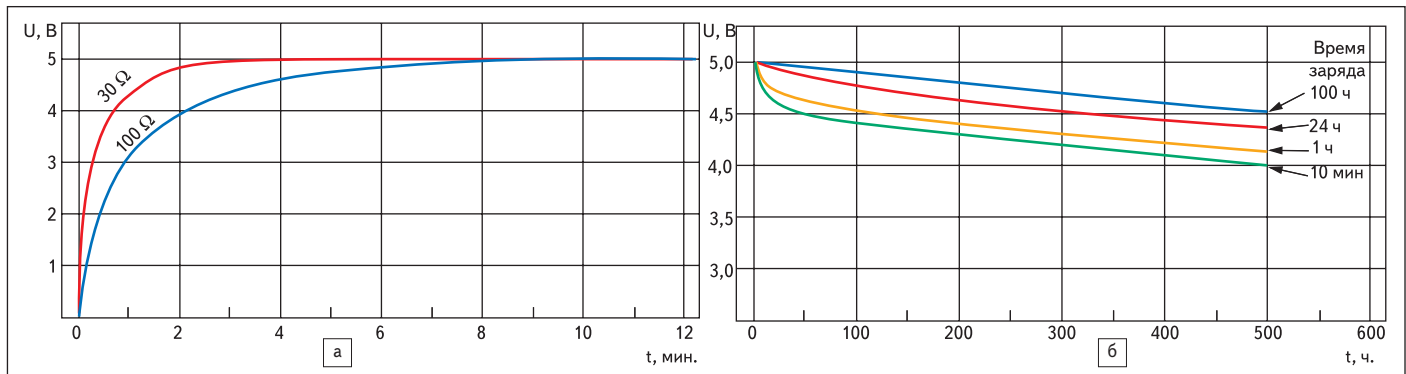


Рис. 12. Характеристика заряда (а) и саморазряда (б) для EECF5R5U105 (5,5 В, 1,0 Ф) при +20 °С

изменяется лишь за счет сопротивления перераспределенных ионов. Чем ниже температура работы ионистора, тем больше время саморазряда, и срок службы устройства будет существенно больше (рис. 13). Поскольку зависимость времени разряда от емкости и сопротивления нагрузки прямо пропорци-

ональная, а от напряжения — логарифмическая (смотри зависимость б), то при большей емкости ионистора и сопротивлении нагрузки, при прочих равных (температура, условия заряда и т. д.), время процесса разряда будет больше (рис. 14а, б). Характеристика разряда, в отличие от саморазряда, зависит от

температуры меньше (рис. 15). Изменение емкости, например, для EECF5R5U104 (5,5 В, 0,1 Ф) (условия измерения: 5,5 В, +70 °С) от тока разряда, приложенного напряжения и температуры фактически начинают проявляться при времени, превышающем 1000 часов (рис. 16).

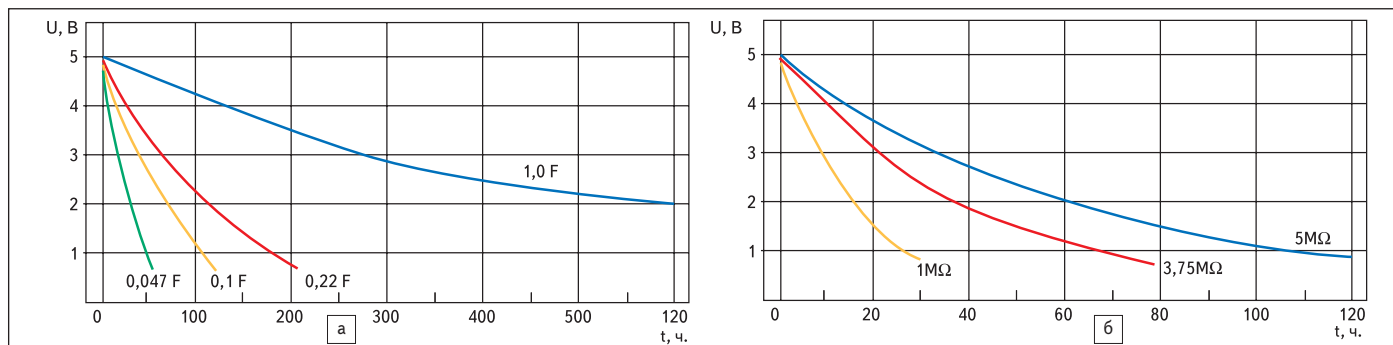


Рис. 14. Характеристика разряда для ионисторов различной емкости при сопротивлении 1 МОм (а) и в зависимости от сопротивления для EEC50HD473V (5,5 В, 0,047 Ф) (б). Условия заряда: 5 В, 24 часа, +20 °С

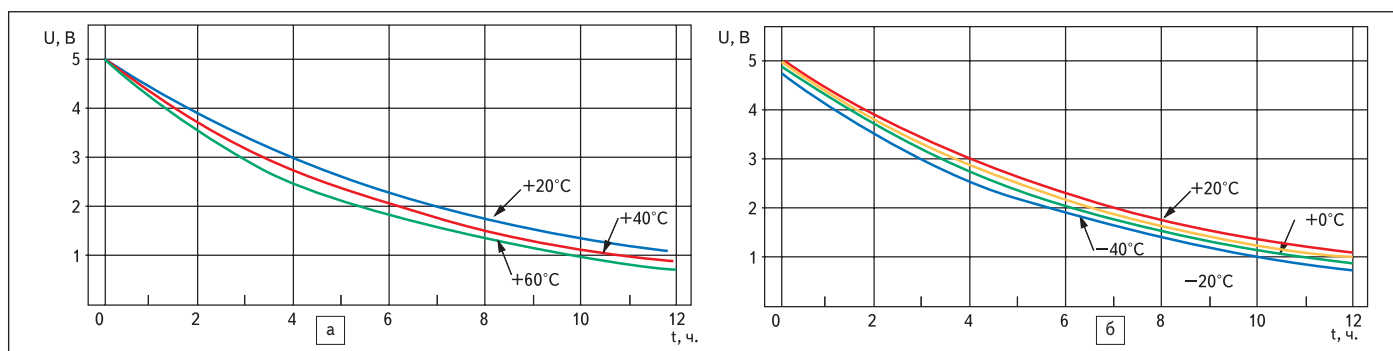


Рис. 15. Характеристика разряда в зависимости от температуры при сопротивлении 250 кОм для EECF5R5U104 (5,5 В, 0,1 Ф). Условия заряда : 5 В, 24 часа, +20 °С

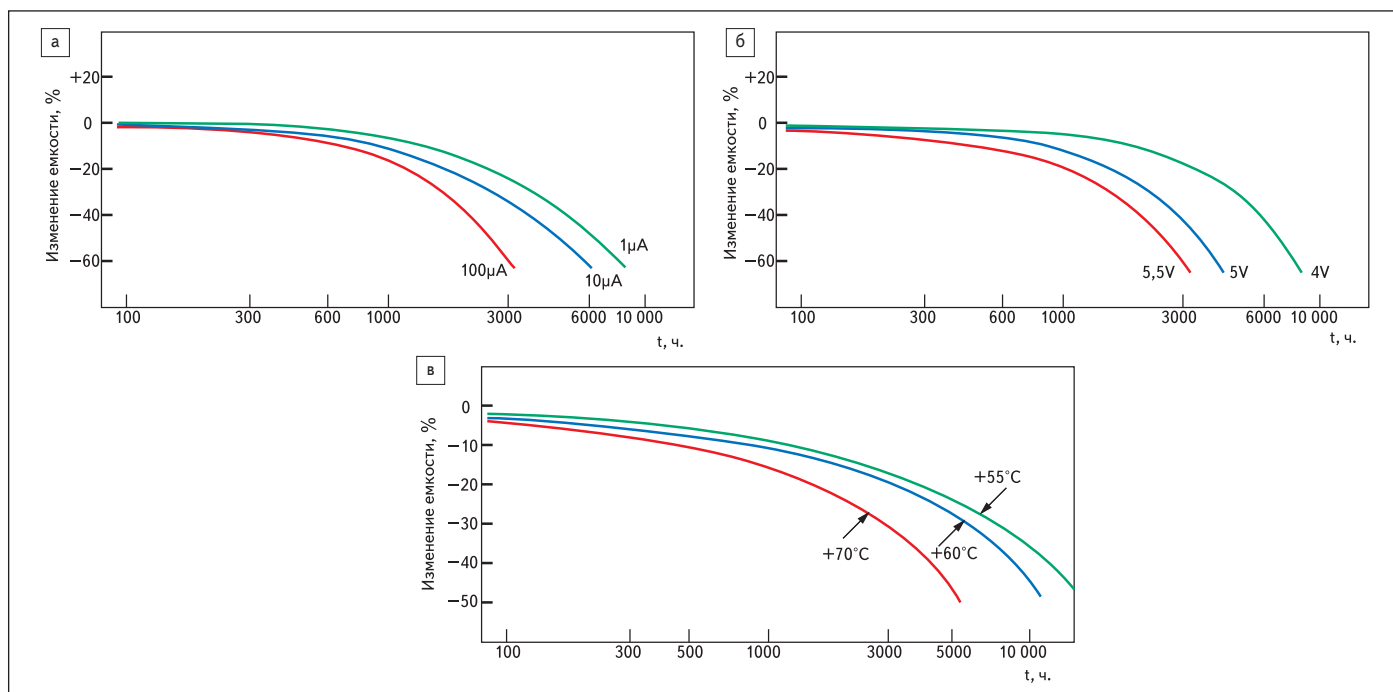


Рис. 16. Зависимость между током разряда (а), приложенным напряжением (б), температурой (в) и изменением емкости для EECF5R5U104 (5,5 В, 0,1 Ф). Условия измерения: 5,5 В, +70 °С