

# Электролитические конденсаторы НИТАСНІ

## для силовой электроники

**Электролитические конденсаторы (ЭК) являются неотъемлемой частью большинства электронных схем. Их цена может вносить существенный вклад в себестоимость всего изделия, что особенно справедливо для устройств силовой электроники. Примером может служить звено постоянного тока силового инвертора, во многом определяющее габариты, стоимость и надежность всего преобразователя. Ошибки в выборе и расчете режимов работы ЭК могут заметно снизить надежность аппаратуры и стать причиной неожиданных отказов. Данная статья посвящена особенностям применения электролитических конденсаторов, предназначенных для использования в изделиях силовой электроники, на примере новых серий ЭК фирмы HITACHI AIC.**

Евгений Карташев, к. т. н.

### Основные особенности и параметры ЭК

#### 1. Особенности конструкции

В обычном алюминиевом ЭК диэлектриком является окись алюминия, подобно *p-n*-переходу она имеет одностороннюю проводимость и способна выдерживать напряжение только одной полярности. Соответственно, при подаче обратного напряжения в ЭК возникают токи утечки.

Оксидный слой не может иметь равномерной толщины по всей поверхности, в зонах с наименьшей толщиной токи утечки  $I_l$  максимальны. Причиной их увеличения также является наличие примесей воды в электролите, что снижает и максимально допустимое напряжение ЭК.

Временная зависимость  $I_l$  после включения описывается выражением:

$$I_l = I_{l5} \times (5/t)^p, \quad (1.1)$$

где  $I_{l5}$  — ток утечки через 5 минут после подачи постоянного напряжения на ЭК, а показатель степени  $p$  имеет значение в диапазоне 0,5...1.

Общая формула для  $I_l$  в установившемся состоянии имеет следующий вид:

$$I_l = k \times C \times U_R, \text{ где константа } k = 3 \times 10^{-3}. \quad (1.2)$$

Практически все параметры ЭК являются термозависимыми. С ростом температуры увеличиваются емкость, проводимость электролита, ток утечки, снижается надежность за счет ускорения коррозионных процессов.

Важное значение имеет временная стабильность характеристик, непосредственно влияющих на срок службы ЭК. Как и для многих других компонентов, выработка ресурса конденсатора происходит при достижении его основными параметрами своих предель-

но допустимых значений. Одним из них является  $R_s$  или ESR (эквивалентное последовательное сопротивление) ЭК, которое состоит из сопротивления выводов и алюминиевой фольги ( $R_{Al}$ ), сопротивления электролита ( $R_E$ ) и сопротивления диэлектрика ( $R_{ox}$ ).

#### 2. Потери

Суммарные потери ЭК можно оценить, зная ток утечки  $I_l$ , среднеквадратичное значение переменного тока  $I_{RMS}$ , текущего через конденсатор, и значения эквивалентных сопротивлений.

Общее омическое сопротивление  $R$  состоит из сопротивления металла и электролита.

Диэлектрические потери пропорциональны энергии, запасенной в конденсаторе:  $W_C = C \times U^2/2$ . Мощность  $P_l$ , рассеиваемая в ЭК, может быть определена следующим образом:

$$P_l = f \times W_C + R \times F, \quad (2.1)$$

где  $f$  — частота перезарядки конденсатора.

Если ток ЭК имеет синусоидальную форму, формула приобретет следующий вид:

$$P_l = f \times C \times U^2/2 + R \times F. \quad (2.2)$$

Поскольку  $I = \omega \times C \times U$ , а  $\omega = 2\pi \times f$ , то

$$P_l = U \times I \times (1/4\pi + 2\pi \times R \times C \times f) = U \times I \times (A + B \times f). \quad (2.3)$$

Сомножитель  $(A + B \times f)$  представляет собой известный всем  $\cos \phi$ . Однако пользоваться этим параметром неудобно, так как обычно  $\phi$  близок к  $90^\circ$ , поэтому при расчетах режимов ЭК обычно используется угол  $\delta = 90 - \phi$ , называемый углом потерь:  $\tan \delta = \sin(90 - \phi)/\cos(90 - \phi) \cong \sin(90 - \phi)$ , так как  $\cos(90 - \phi) \cong 1$ . В результате мы получаем выражение

для расчета мощности рассеяния в простейшей форме:

$$P_1 = U \times I \times \tan \delta \quad (2.4)$$

Ошибка, возникающая из-за принятой аппроксимации, несущественна для вычислений потерь ЭК, а измерение  $\tan \delta$  намного проще, чем  $\cos \phi$ . Этот параметр называется тангенсом угла потерь и приводится в справочных данных конденсаторов.

Подставляя в (2.2)  $U = I/\omega C$ , получаем:

$$P_1 = I^2 \times (R + k/(4\pi \times 2f \times C)). \quad (2.5)$$

Таким образом можно определить  $R_S$  или ESR — эквивалентное последовательное сопротивление, значение которого должно указываться в технических характеристиках.

$$R_S = R + k/(4\pi^2 \times f \times C). \quad (2.6)$$

Как видно из (2.6), параметр  $R_S$  является частотно зависимым, типовой график  $R_S$  в функции от частоты для ЭК 68 мкФ 450 В приведен на рис. 1. Наличие нелинейной зависимости параметров конденсаторов несколько затрудняет расчеты потерь. Кроме того, если ток имеет сложный спектральный состав, необходимо знать величину каждой гармоники. Однако если низшие гармоники достаточно велики и частотно-зависимый компонент мал по сравнению с омическим сопротивлением, расчет становится достаточно простым. Обычно на частотах выше 500 Гц ESR становится практически неизменным и формула для мощности потерь приобретает следующий вид.

$$P_1 = I^2 \times R_S \text{ (при } f > 500 \text{ Гц}) \quad (2.7)$$

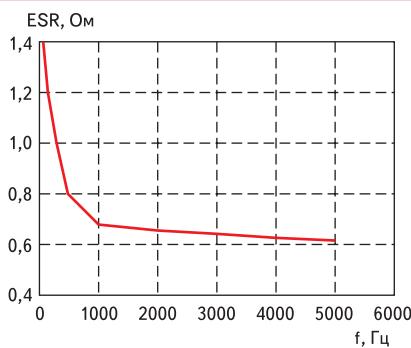


Рис. 1. Зависимость параметра ESR от частоты

### 3. Тепловой расчет

Температура перегрева ЭК зависит от  $R_S$  и среднеквадратичного значения переменного тока  $I_{RMS}$ . Обозначим температуру в наиболее нагретой точке конденсатора (в англоязычной литературе «hot spot»)  $T_{hs}$ , а температуру окружающей среды —  $T_a$ . В рабочем диапазоне перегрев является линейной функцией мощности потерь  $P$ , при этом справедливы следующие соотношения:

$$P = R_S \times I^2, \quad (3.1)$$

$$T_{hs} = T_a + R_{th} \times P, \quad (3.2)$$

где  $R_{th}$  — тепловое сопротивление «точка перегрева — окружающая среда».

### 4. Срок службы и надежность

Как правило, производители ЭК в технической документации приводят минимальный набор параметров: предельное напряжение, допустимый ток пульсаций при заданной частоте, тангенс угла потерь, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), эквивалентная последовательная индуктивность (ESL). В спецификациях более «продвинутых» изготовителей ЭК можно найти таблицу поправочных коэффициентов для тока пульсаций и показатели надежности. Например, конденсаторы HU3/HU4 фирмы НИТАСИ имают ресурс свыше 600 тыс. часов при номинальном токе пульсаций и температуре 50 °C. Этот же параметр не превышает 4 тыс. часов при предельной температуре. Однако при расчете схемы разработчику хотелось бы знать, сколько конкретно прослужат емкости при заданных рабочих режимах. Это необходимо и для определения минимального номинала ЭК, поскольку современные высоковольтные конденсаторы вносят значительный вклад в габариты и стоимость изделия.

На ресурс и надежность ЭК основное влияние оказывают рабочее напряжение и температура. Для оценки влияния первого параметра на срок службы  $L_{op}$  используется следующее соотношение:

$$L_{op} = L_{opR} \times (U_R/U_{op})^n, \quad (4.1)$$

где  $U_{op}$  — рабочее напряжение,  $U_R$  — предельно допустимое напряжение,  $L_{opR}$  — срок службы ЭК при  $U = U_R$ .

Показатель степени  $n = 5$  при  $0,8U_R < U < U_R$ ;  $n = 3$  при  $0,5U_R < U < 0,8U_R$ . Это означает, что снижение рабочего напряжения на 21% увеличивает ресурс ЭК вдвое, а при  $U < 0,5U_R$ , его влиянием можно пренебречь.

Срок службы имеет экспоненциальную температурную зависимость, график которой может быть описан выражением:

$$\ln(L_{op}) = A - B \times T. \quad (4.2)$$

Надежность ЭК увеличивается с увеличением его линейных размеров, например, формула, учитывающая диаметр конденсатора, имеет следующий вид:

$$L_{opR} = f(D) \times 2^{(85-\bar{T}_{hs})/12}. \quad (4.3)$$

(Для конденсаторов, рассчитанных на 105° вместо 85°, в показателе степени должно быть 105).

Значение  $f(D)$  для различных значений диаметра приведено в таблице 1.

Параметр  $L_{op}$  определяется как время, в течение которого параметры ЭК находятся в пре-

Таблица 1

Диаметр, мм	f(D)
35	30 000
50	35 000
65	45 000
75	60 000

делах определенных допусков. У каждого производителя значения допусков свои. Например, HITACHI и RIFA так определяют предельное состояние ЭК:

- Изменение емкости более чем на 10...15%.
- Увеличение  $\tan \delta$  более чем в 1,3 раза.
- Увеличение ESR более чем в 2 раза.

Когда большое количество конденсаторов (назовем его  $N_0$ ) испытывается при заданных условиях, то через определенное время некоторые параметры ЭК подойдут к своему предельному значению. Количество ЭК, сохранивших свои параметры в пределах допусков —  $R(t)$ , будет со временем становиться меньше в соответствии с выражением:

$$R(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}, \quad (4.4)$$

где  $\lambda$  — частота отказов.

Вероятность отказа  $F(t)$  можно определить как:

$$F(t) = 1 - S(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4.5)$$

где  $S(t)$  — вероятность, что 1 конденсатор прослужит время  $t$ .

Зависимость срока службы  $L_{op}$  от вероятности отказа можно определить следующим образом:

$$L_{op} = 1/\lambda \times \ln 1/(1 - F) = m \times \ln 1/(1 - F) \quad (4.6)$$

где  $m$  — среднее время между отказами (в технической литературе этот параметр также называется MTBF — Mean Time Between Failure).

$L_{op}$  и  $\lambda$  экспоненциально зависят от температуры:  $\lambda$  возрастает, а  $L_{op}$  снижается.

Упрощенное выражение для  $\lambda$  выглядит следующим образом:

$$\lambda = 2,5 \times 10^{-7} \times 2^{(\bar{T}_{hs}-85)/8}. \quad (4.7)$$

Для конденсаторов 105° в показателе степени надо заменить 85 на 105.

Для примера рассчитаем температуру нагрева ЭК диаметром 50 мм при условии, что он работает при предельном напряжении ( $U = U_R$ ) и срок службы должен быть не менее 5 лет.

Решая формулу 4.3 для  $T_{hs}$ , получим:

$$\bar{T}_{hs} = 85 - \frac{12 \ln \frac{5 \times 24 \times 365}{35000}}{\ln 2} = 81.$$

### 5. Электрическая и тепловая модель электролитического конденсатора

Упрощенная эквивалентная электрическая схема ЭК приведена на рис. 2а.

$L$  — суммарная индуктивность выводов;  
 $R$  — суммарное омическое сопротивление выводов, фольги и электролита;

$R_L$  — сопротивление утечки;

$R_{th}$  — тепловое сопротивление;

$C_{th}$  — теплоемкость.

Параметр  $I_L$  определяется как омический ток при рабочем напряжении, не превышающем предельного значения. Данная модель с достаточной степенью точности может быть использована при расчетах с помощью программ

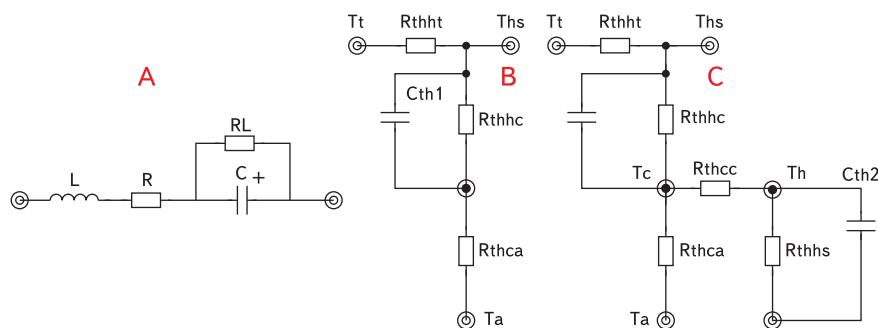


Рис. 2. А – упрощенная электрическая схема ЭК, В и С – тепловые эквивалентные схемы ЭК

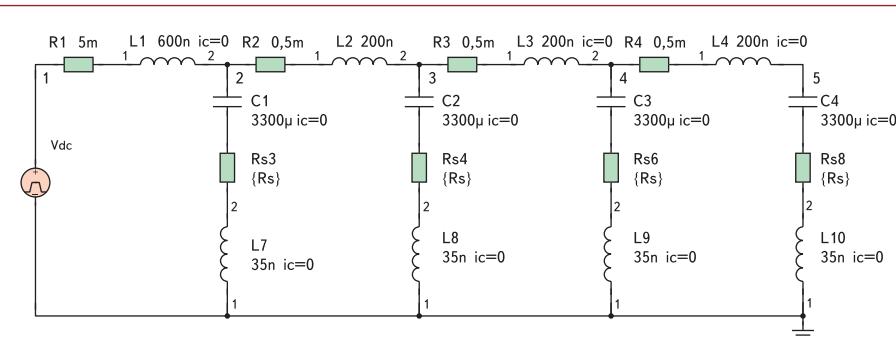


Рис. 3. Эквивалентная схема параллельного соединения ЭК

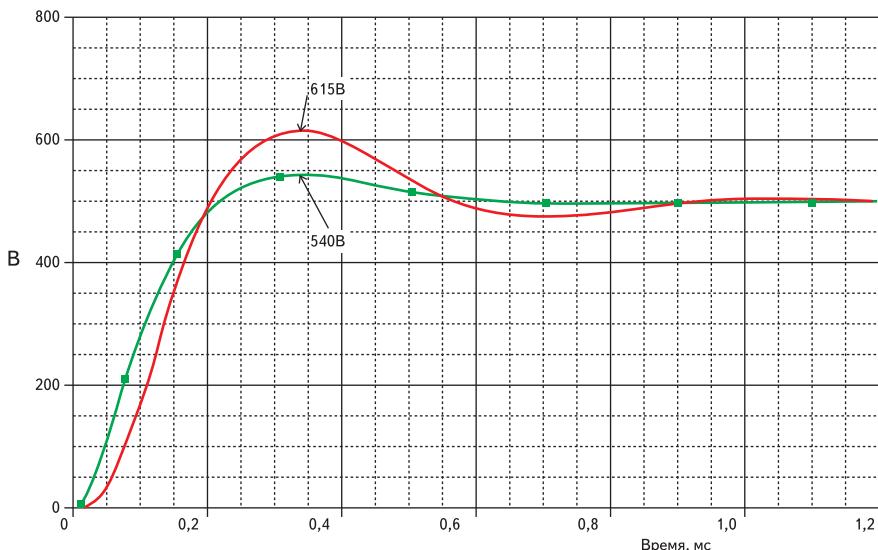


Рис. 4. Переходное напряжение на конденсаторе С4 при температуре 20 и 85 °С

схемотехнического моделирования (например, PSPICE).

Токи перезаряда конденсатора приводят к потерям мощности на омическом сопротивлении, кроме того, потери создаются токами утечки. Они проявляются в повышении температуры  $\Delta T$ , пропорциональном мощности рассеяния  $P$ .

$$\Delta T = R_{th} \times P,$$

где  $R_{th}$  — тепловое сопротивление конденсатора.

Наиболее нагретая точка, имеющая температуру  $T_{hs}$ , обычно расположена в геометрическом центре ЭК. Тепло распространяется

во все стороны через электролит, фольгу, выводы, корпус и т. д. Основными параметрами, характеризующими тепловое поведение конденсатора, являются  $R_{thhc}$  — тепловое сопротивление «точка перегрева — корпус» и  $R_{thca}$  — тепловое сопротивление «корпус — окружающая среда». Если ЭК установлен на теплоисточник, добавляется тепловое сопротивление «корпус — теплоотвод»  $R_{thcc}$ , зависящее от размера, формы радиатора и способа конвекции воздуха.

На тепловые режимы при импульсном характере работы влияние оказывает также тепловая емкость конденсатора  $C_{th}$ , которая зависит от массы и материала конденсатора. В модели ЭК такую емкость можно было

бы установить параллельно каждому сопротивлению кроме  $R_{thca}$  — ей можно пренебречь благодаря низкой теплоемкости воздуха.

На рис. 2б и 2с приведены эквивалентные тепловые схемы для случая естественного охлаждения и установки ЭК на радиатор. Температура выводов конденсатора обозначена  $T_p$ , температура корпуса  $T_c$  измеряется в точке, противоположной выводам.

Приведенные выше выражения и цифры являются основными данными для расчета нагрева ЭК, в какой бы схеме он ни работал. К сожалению, в каталогах большинства фирм-производителей (как и в отечественных ТУ) тепловые характеристики конденсаторов, как правило, отсутствуют.

## 6. Параллельное и последовательное соединение ЭК

Соединение ЭК используется для повышения емкости, увеличения допустимого напряжения или тока пульсаций и не вызывает, на первый взгляд, никаких проблем. Однако проблемы существуют, и связаны они в первую очередь с возникновением переходных помех при включении из-за паразитной индуктивности соединительных проводов.

На рис. 3 показана схема параллельного соединения 4 конденсаторов С1 — С4 емкостью по 3300 мкФ. В схеме также присутствуют паразитные индуктивности проводов L1 — L4 (200 нГн между элементами и 600 нГн — подводящая цепь). Если бы в реальной схеме не было шунтирующего влияния распределенных сопротивлений проводов R1 — R4 и ESR-конденсаторов ( $R_s$ ), то из-за наличия колебательных контуров могли бы наблюдатьсь очень высокие перенапряжения.

На рис. 4 приведены эпюры напряжения на емкости С4 для двух значений температуры — 20 и 85 °С. Разница в характере переходного напряжения объясняется тем, что при нагреве от 20 до 85 °С эквивалентное сопротивление ЭК ( $R_s$ ) изменяет свое значение от 22 до 7 мОм. Величина перенапряжения зависит и от номинала конденсатора, оба указанных фактора необходимо учитывать при расчетах.

Последовательное соединение ЭК используется для высоковольтных схем. При этом, как правило, приходится включать конденсаторы последовательно-параллельно для получения необходимой величины емкости.

Анализ переходных искажений в комбинированной схеме производится аналогично, при этом следует учесть паразитные параметры проводов между последовательно соединенными конденсаторами. Не забудьте про разброс номиналов конденсаторов, который может привести к опасному разбалансу напряжений.

При последовательном соединении параллельно каждому ЭК необходимо установить резистор для устранения перекоса напряжения из-за разности токов утечки конденсаторов. Номиналы уравнивающих резисторов можно рассчитать по формуле:

$$R = 1000 / (0,015 \times C), \quad (6.1)$$

где  $C$  — емкость в мкФ,  $R$  — сопротивление в кОм.

Формула 6.1 выведена на основании известного соотношения для тока утечки  $I_L = k \times C \times U_R$ , где константа  $k = 3 \times 10^{-3}$ . Ток резистора  $I_R$  должен быть больше тока утечки, который имеет большой разброс и сильно зависит от условий эксплуатации. Часто оказывается, что правильно рассчитанный уравнивающий резистор расходует довольно большую мощность, и с этим приходится мириться.

Резисторы обеспечивают уравнивание напряжения только для постоянного тока и низких частот, распределение пульсаций с частотами порядка сотен герц и выше определяется только соотношением емкостей.

### 7. Причины отказов ЭК

Основным фактором, приводящим к деградации и выходу из строя ЭК, является диффузия электролита через изолятор. Этот процесс ускоряется с ростом температуры и в наибольшей степени определяет срок службы конденсатора.

Ниже приведены некоторые причины, способные привести к преждевременному отказу ЭК:

- переохлаждение (обычно ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ ) → резкий рост ESR и падение емкости;
- перегрев (повышенная температура окружающей среды или превышение допустимого тока пульсаций) → рост ESR и тока утечки, падение емкости;
- превышение рабочего напряжения → рост ESR и падение емкости;
- переходные перенапряжения → повышение тока утечки и внутреннее короткое замыкание;
- воздействие высоких частот → изменение емкости и ESR;
- воздействие обратного напряжения → повышение тока утечки, потеря емкости, увеличение ESR, сокращение срока службы;
- механические вибрации → внутреннее короткое замыкание, увеличение тока утечки, потеря емкости.

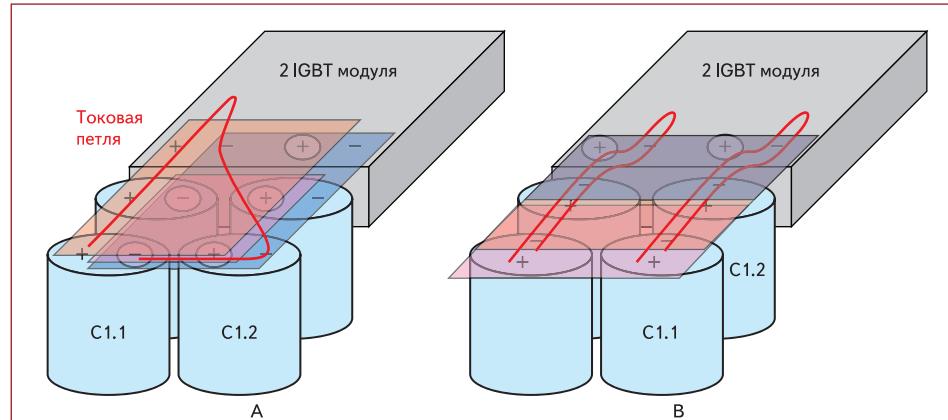
### 8. Выбор и расчет ЭК

В самом общем случае расчет номинала ЭК включает следующие действия:

- Выбирается номинал конденсатора, обеспечивающий необходимую мощность нагрузки или заданное минимальное выпрямленное напряжение.
- Найденное значение корректируется с учетом разброса номинала, временного и температурного изменения номинала.
- Из каталога выбирается ближайшее минимальное значение номинала конденсатора.
- Рассчитывается среднеквадратичное значение тока пульсаций для нового конденсатора, определяется температура нагрева ЭК и срок его службы.

### Электролитические конденсаторы для мощных применений

Специфика конденсаторов, предназначенных для использования в изделиях силовой электроники, в первую очередь определяется требованиями, предъявляемыми к звену постоянного тока преобразовательного устрой-



**Рис. 5.** Влияние положения выводов конденсаторов на величину паразитной индуктивности звена постоянного тока: А и В – неправильная и правильная ориентация ЭК

ства. При выборе ЭК для данного применения необходимо определить суммарное значение емкости и рабочего напряжения, обеспечивающих безопасное функционирование конвертора с учетом нагрузочных и тепловых режимов, а также колебаний напряжения питания.

На работу конденсаторов, применяемых в силовых DC-шинах, большое влияние оказывают их распределенные параметры: ESL (Equivalent Series inductance) — эквивалентная последовательная индуктивность и ESR (Equivalent Series Resistance) — эквивалентное последовательное сопротивление. Индуктивность ESL во многом определяет частотные свойства конденсатора и участвует в образовании паразитного контура шины. Распределенное сопротивление ESR в данном случае играет положительную роль, так как является демпфирующим для этого контура. Именно поэтому при использовании очень популярных в настоящее время пленочных конденсаторов, имеющих пониженное значение ESR, проблема ограничения коммутационных перенапряжений стоит более остро, чем для звена постоянного тока с электролитическими конденсаторами.

Важнейшим требованием, предъявляемым к DC-шине, является согласование ее рабочего напряжения с предельными характеристиками силовых ключей и напряжением питания преобразовательного устройства. При проектировании шины питания инвертора, работающего от промышленных сетей 400/690 В, приходится использовать параллельно-последовательное соединение достаточно большого количества ЭК. Это создает ряд проблем, как конструкторских, так и схемных: необходимо обеспечить надежное крепление банка конденсаторов, при работе в импульсных режимах схема соединений должна осуществлять выравнивание динамических токов и исключать перегрев и перегрузку по напряжению каждого конденсатора звена. В результате звено постоянного тока является узлом, во многом определяющим габариты, надежность и стоимость всего преобразователя.

На рис. 5 приведены варианты размещения двух параллельных пар последовательно соединенных конденсаторов. Обратите внимание на то, что даже положение их выводов существенно влияет на площадь токовой петли, не-

посредственно определяющей величину паразитной индуктивности DC-шины ( $1 \text{ см}^2 \times 10 \text{ нГн}$ ).

На рис. 6 показана конструкция DC-шины универсального модуля привода SEMIKUBE [5], разработанного дизайнерским центром компании SEMIKRON. На проектирование этого узла инвертора ушло достаточно много времени, большую часть которого занял поиск топологии, обеспечивающей минимальное значение распределенной индуктивности, отсутствие зон локального перегрева и абсолютную симметричность токов и напряжений ЭК. В окончательном виде получилась компактная конструкция, содержащая 12 ( $3 \times 4$ ) конденсаторов емкостью 4700 мкФ. Общая емкость звена постоянного тока составляет 14 мФ при напряжении 800 В, суммарная распределенная индуктивность кoplanарной шины SEMIKUBE имеет рекордно низкое значение — менее 12 нГн, небаланс токов не превышает 5%. Одна такая конструкция работает совместно с инвертором номинальной мощностью 220 кВт, удельная емкость при этом составляет около 60 мкФ/кВт.



**Рис. 6.** Конструкция DC-шины модуля SEMIKUBE

Большинство из описанных выше проблем, связанных с необходимостью параллельно-последовательного соединения, обусловлены тем, что максимальное рабочее напряжение подавляющего большинства выпускаемых до настоящего времени ЭК не превышало 400–450 В. Этот факт стал причиной растущей популярности пленочных конденсаторов MKP/MPP, производимых ELECTRONICON, EPCOS. Эти компоненты способны работать при напряжении DC-шины до 1300 В и выше [6]. Однако широкое распространение компонентов данного типа пока ограничивается высокой стоимостью и большим весом, поэтому производители ЭК продолжают искать технологические способы повышения их блокирующей способности.

## Серии электролитических конденсаторов HITACHI-AIC с болтовыми выводами

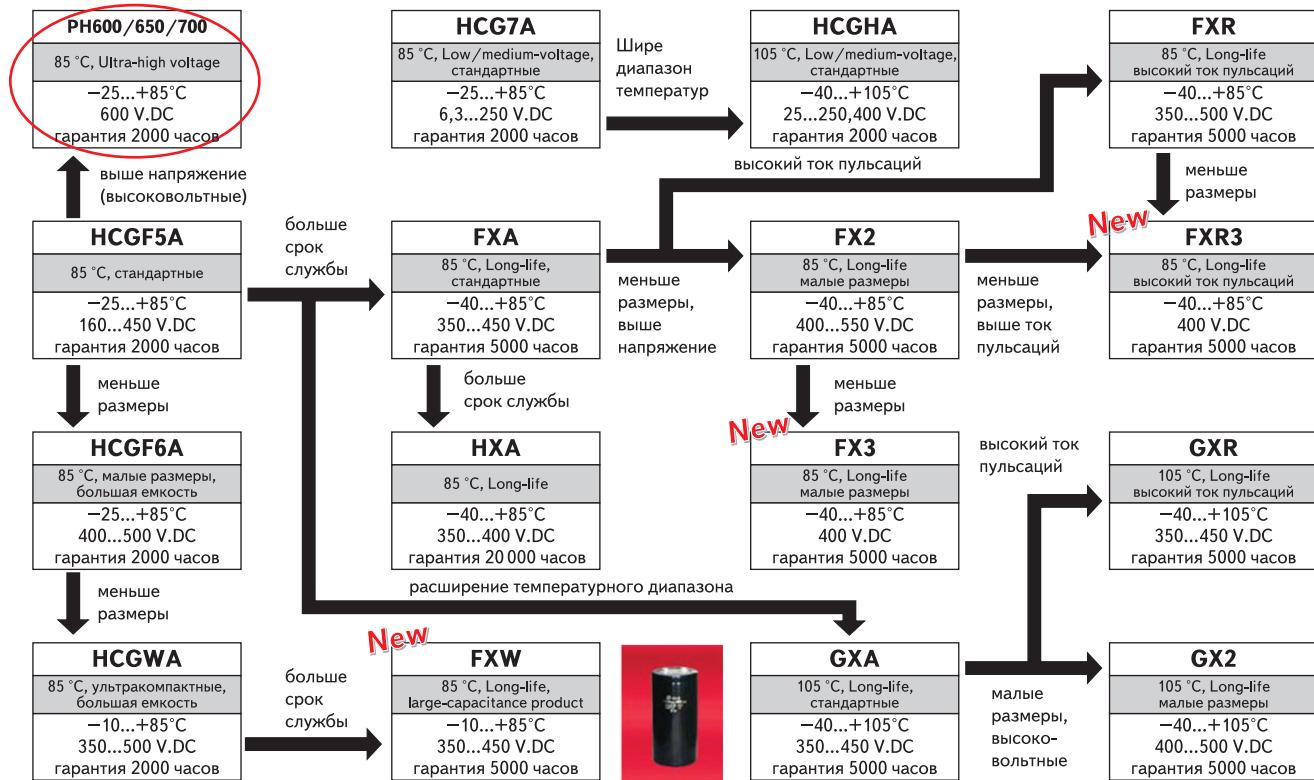


Рис. 7. Основные характеристики серий ЭК HITACHI

Таблица 2. Основные характеристики ЭК серии PH

Тип ЭК	Емкость, мкФ	U <sub>ном</sub> / U <sub>макс</sub> (30с), В	Размер D×L, мм	I <sub>r</sub> * (85 °C, 120 Гц), Arms	ESR (20 °C, 100 Гц), мОм	ESL, нГн
PH600V122	1200	600/650	64 × 96	6,7	121	22
PH600V152	1500	600/650	64 × 115	8,1	112	22
PH600V182	1800	600/650	77 × 96	8,8	97	24
PH600V222	2200	600/650	77 × 115	10,4	81	24
PH600V272	2700	600/650	77 × 130	12,1	66	24
PH600V332	3300	600/650	90 × 131	14,3	44	24
PH600V472	4700	600/650	90 × 147	18,3	31	24
PH650V122	1200	650/700	64 × 96	7,9	98	22
PH650V152	1500	650/700	64 × 115	9,5	78	22
PH650V182	1800	650/700	77 × 96	10,4	65	24
PH650V222	2200	650/700	77 × 115	12,2	53	24
PH650V332	3300	650/700	90 × 131	16,8	35	24
PH650V372	3900	650/700	90 × 157	19,6	30	24
PH700V821	820	700/750	64 × 115	4,5	-	-
PH700V102	1000	700/750	64 × 130	5,5	-	-
PH700V122	1200	700/750	77 × 115	6,6	-	-
PH700V152	1500	700/750	77 × 130	7,5	-	-
PH700V182	1800	700/750	77 × 155	9,0	-	-
PH700V272	2700	700/750	90 × 157	11,7	-	-

\* Примечание: корректирующие коэффициенты для расчета допустимого тока пульсаций  $I_r$  в зависимости от температуры, частоты и скорости охлаждающего воздуха приводятся в технических характеристиках

Таблица 3. Рекомендации по выбору балластных резисторов

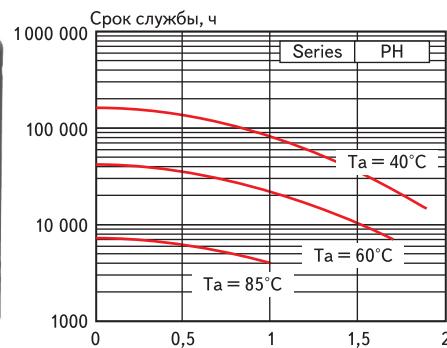
Ta	U <sub>n</sub> < 650 В		U <sub>n</sub> < 650 В	
	C < 2700 мкФ	C > 2700 мкФ	C < 1800 мкФ	C > 1800 мкФ
< 40 °C	R <sub>s</sub> = 82 кОм	R <sub>s</sub> = 68 кОм	R <sub>s</sub> = 68 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм
40...70 °C	R <sub>s</sub> = 68 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм
> 70 °C	R <sub>s</sub> = 47 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм	R <sub>s</sub> = 47 кОм	R <sub>s</sub> = 27 кОм

На российском и мировом рынке хорошо известна продукция компании HITACHI AIC, выпускающей широкую номенклатуру конденсаторов для различных применений, в том числе и мощных. Основные серии высоковольтных ЭК HITACHI и их краткие характеристики приведены на рис. 7. Существенным достижением фирмы на пути проектирования ЭК для силовой электроники можно считать разработку серии PH с рабочим/пределным напряжением 600/650/700 В (выделено красным цветом на рис. 7). Необходимо отметить, что значение 550–600 В (DC) является минимально допустимым, позволяющим конденсаторам работать без последовательного соединения в звене постоянного тока преобразователей, питающихся от промышленной сети 380 В (AC).

Характеристики ЭК серии PH приведены ниже и в таблице 2:

- рабочее напряжение: 600/650/700 В;
- $\tan\delta = 0,2$  при  $f = 120$  Гц;
- рабочая температура: -25...+85 °C;
- ток утечки: 0,01 C-V (мкА) и не более 2 мА;
- срок службы: 6000 часов при 85 °C и nominalном токе пульсаций  $I_r$ ;
- интенсивность отказов: 0,5 FIT (Failure In Time =  $10^{-9}$  отказов в час) в течение срока службы (это означает, что из 20 тыс. конденсаторов, находящихся в эксплуатации, за 10 лет откажет только 1).

На рис. 8 показан внешний вид конденсатора серии PH и график зависимости среднего срока службы от нормированного значения тока пульсаций ( $II_r$ ) при различной температуре.



**Рис. 8.** Внешний вид и зависимость срока службы от нормированного тока пульсаций  $I/I_r$  для конденсаторов серии PH

В случае, если последовательное соединение емкостей необходимо (например, при питании от сетей 690 В), параллельно каждому конденсатору должен быть установлен балластный резистор  $R_s$ , выбранный в соответствии с рекомендациями, данными в табл. 3.

### Заключение

Разработка конструкции преобразователей средней и большой мощности является сложнейшей задачей, требующей тщательного подхода к анализу распределенных параметров конструкции. Одним из наиболее сложных в проектировании узлов силовых конверторов

является звено постоянного тока, содержащее силовые шины и банк конденсаторов. Этот узел до сих пор во многом определяет надежность, габариты и стоимость всего изделия. Несмотря на разработку новых технологий конденсаторов (например, пленочных МКР/МПР) и многочисленные попытки проектирования так называемых «матричных» конверторов, осуществляющих прямое двунаправленное преобразование энергии от сети к потребителю, электролитические конденсаторы еще достаточно долго будут востребованы рынком.

Много лет компания HITACHI AIC является одним из мировых лидеров рынка ЭК, в производственной программе фирмы есть не-

сколько серий высоконадежных конденсаторов, ориентированных на силовые применения, такие как инверторы для общепромышленных приводов и электротранспорта. Одной из наиболее интересных разработок последних лет явился выпуск компонентов серии PH, отличающихся повышенным рабочим напряжением. Это позволяет решить одну из наиболее сложных проблем, связанных с работой конденсаторов в промышленных преобразователях, избавиться в ряде случаев от необходимости последовательного соединения и повысить надежность звена постоянного тока.

### Литература

1. HITACHI AIC Compact Aluminium-Electrolytic Capacitors 1998/1999.
2. RIFA Electrolytic Capacitors. Theory and Application.
3. Звонарев Е. Электролитические и tantalевые конденсаторы HITACHI AIC // Силовая Электроника. 2007. № 2.
4. Колпаков А. Расчет конденсаторов шины питания мощных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии. 2004. № 2.
5. Колпаков А. Инверторная платформа SEMIKUBE — quadratisch, praktisch, gut! // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
6. Колпаков А. Конденсаторы ELECTRONICON для высоковольтных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии. 2004. № 6.