

# Силовые конденсаторы шины питания

## мощных преобразователей частоты

**Совершенствование полупроводниковых ключевых элементов силовых преобразователей частоты (ПЧ) позволяет производить их переключение на все более высоких частотах и рабочих напряжениях, увеличивая таким образом энергетическую эффективность и снижая (при условии паритета передаваемой мощности) массо-габаритные размеры ПЧ. Одновременно повышение тактовой частоты в сочетании с высокой крутизной наносекундных фронтов импульсов ШИМ приводит к значительным переходным перенапряжениям, предъявляющим соответствующие требования к конструктивному построению преобразователя, в частности, к выбору типа конденсаторов DC-шины [1] — связующего звена между выпрямителем и инвертором ПЧ, во многом определяющего эксплуатационную надежность его силовой части.**

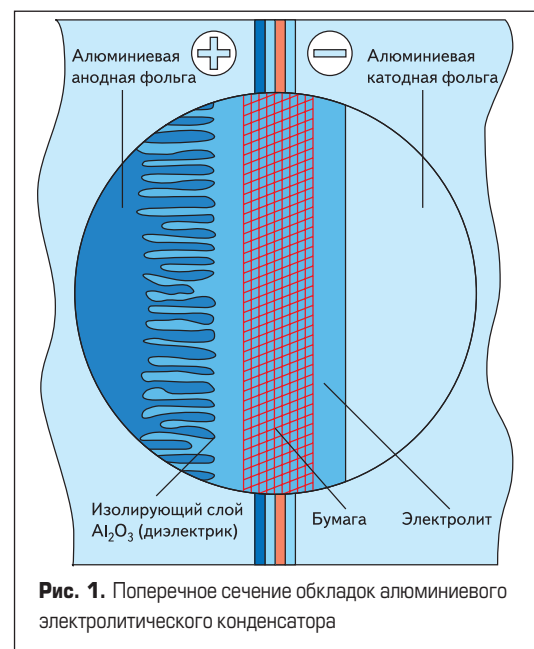
**Сергей Шишкин,  
к. т. н.**

shishkin53@mail.ru

Для конденсаторов DC-шины питания ПЧ предпочтительно, чтобы допустимый ток пульсации ( $I_{\sim R}$  — rated ripple current), с учетом температурной и частотной коррекции, был как можно выше, а эквивалентное последовательное сопротивление (ESR — equivalent series resistance) и собственная индуктивность (ESL — capacitor self-inductance) как можно ниже. Традиционно в звеньях фильтрации постоянного тока ПЧ на базе IGBT-транзисторов широко используются алюминиевые электролитические конденсаторы (ЭК) повышенной мощности. Как известно, данные ЭК (рис. 1) состоят из разделенных слоев диэлектрика двух электропроводящих слоев алюминиевой фольги — анода и катода, причем одна из сторон фольги протравливается для получения шероховатостей (анодное оксидирование), увеличивающих площадь поверхности (удельную емкость конденсатора). Роль диэлектрика выполняет образовавшийся в результате электрохимической реакции на фольге анода (первой обкладке) слой оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), толщина которого должна быть адекватна номинальному напряжению ЭК (порядка 1,2 нм/В [2]). Контактная поверхность катода используется для передачи электрического заряда к электролиту (второй обкладке ЭК), заполняющему пространство между анодом и катодом (рис. 1). Требуемая диэлектрическая прочность системы «катод-электролит-анод» ( $\approx 8$  МВ/см) обеспечивается с помощью пористой бумажной прокладки, которая помимо задачи сохранения электролита физически разделяет анод и катод. Отметим, что технологические модернизации силовых ЭК ведущих производителей в первую очередь касаются процесса намотки обкладок, гомогенности алюминиевой фольги, совершенствования процесса травления (повышения стойкости слоя оксида), состава электролита (сохранении стабильности параметров при резких скачках температуры), материалов гер-

метизации корпуса, фактуры и повышения электрической прочности бумаги. Однако даже этого бывает недостаточно для обеспечения длительного срока службы ЭК в сглаживающем звене ПЧ, характеризующемся значительными пульсациями тока перезаряда —  $I_{\sim}$ , поскольку допустимый импульсный ток конденсатора обратно пропорционален его ESR.

Старение ЭК обусловлено различными химическими (например, естественной деградацией оксида алюминия) и физическими (например, диффузией паров электролита через элементы уплотнения) причинами. В случае превышения допустимой температуры (табл. 1), интенсивность старения (сокращения срока службы ЭК) резко возрастает [2, 3], поскольку электролит, за счет выделения растворенного газа,



**Рис. 1.** Поперечное сечение обкладок алюминиевого электролитического конденсатора

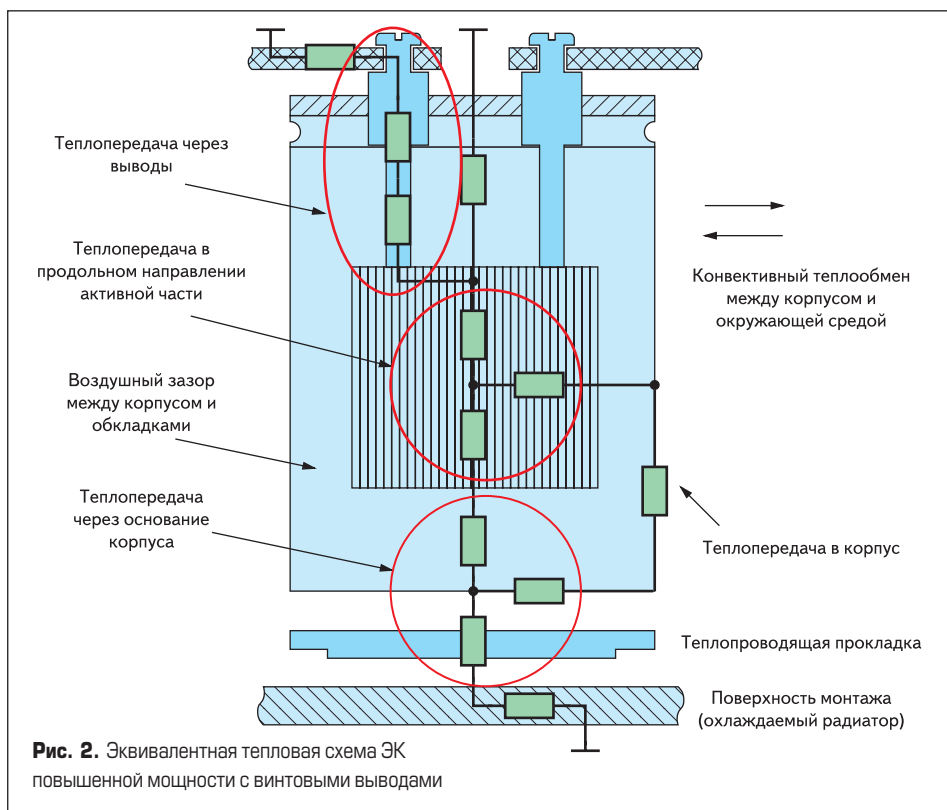


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема ЭК повышенной мощности с винтовыми выводами

образующегося при гидролизе, выдавливается из пространства между скрученными электродами. В результате увеличивается ESR, что стимулирует еще больший нагрев ЭК, превышение предельно допустимой температуры внутри корпуса, рост парциального давления электролита, приводящий к его выбросу через предохранительный клапан или механическому повреждению уплотнения. Температура в наиболее горячей точке (hot spot) —  $T_{\text{макс}}$ , обычно находящейся в геометрическом центре ЭК [1], определяется внутренними потерями —  $P_{\text{внутр.}} = I^2 \times \text{ESR}$ , тепловым сопротивлением —  $R_t$  (К/Вт) и температурой окружающей среды —  $T_{\text{амб}}$ :

$$T_{\text{макс.}} = (I^2 \times \text{ESR}) \times R_t + T_{\text{амб.}} \quad (1)$$

В рабочем диапазоне  $T_{\text{макс}}$  (1) является линейной функцией внутренних потерь ЭК, так как небольшими дополнительными потерями, создаваемыми током утечки —  $I_L$  (табл. 1), можно пренебречь [1]. Таким образом, тепловое сопротивление «наиболее горячая точка — окружающая среда», наряду с величиной ESR, зависящей от  $C_n$  (табл. 1), tgδ — значения угла диэлектрических потерь на частоте пульсации выпрямленного тока  $I_{\sim}$ , во многом определяет температурный режим ЭК [2].

Выделяемое тепло отводится во внешнюю среду тремя путями: через выводы, стенки корпуса и основание ЭК (рис. 2). Особенность конструкции активной части ЭК повышенной мощности — наличие воздушного промежутка (толщиной до нескольких миллиметров) по всей высоте активной части (рис. 2) — допускает лишь конвективный теплообмен обкладок с цилиндрической стенкой корпуса в радиальном направлении, а выступ фольги катода за нижний край рулона [2] обеспечивает преимущественно продольный (80–85% от суммарного баланса) вынос теп-

ла к основанию посредством теплопередачи. Поэтому улучшение теплового контакта в области основания корпуса ЭК повышенной мощности играет чрезвычайно важную роль. Торцевое крепление наружного изоляционного рукава корпуса, заходящее на днище ЭК, создает воздушный зазор, представляющий для теплообмена с поверхностью монтажа (воздушный зазор 0,2 мм имеет тепловое сопротивление  $\approx 1,4$  К/Вт). Установка,

Таблица 1. Основные технические параметры алюминиевых электролитических конденсаторов повышенной мощности [2, 3]

Параметр	Диапазон значений	
	серия В43456/В43458* EPCOS AG	серия FXA** HITACHI AIC
Номинальное напряжение, $U_n$	350, 400, 450 В	350, 450 В
Импульсное напряжение, $U_{\text{имп}}$	$1,10 \times U_n$ (при $U_n \geq 350$ В)	
Номинальная емкость, $C_n$	1000–18 000 мкФ	1000–18 000 мкФ
Допустимое отклонение $C_n$ , $\Delta C_n$	$\pm 20\%$ (код = M)	$\pm 20\%$
Максимальный tgδ (100 Гц, 20 °С)	0,20	
Ток утечки, $I_L$ (5 мин, при 20 °С)	$I_L \leq 0,3 \text{ мкА} (C_n \text{ мкФ } U_n \text{ В})^{0,7} + 4 \text{ мкА}$	$0,1 \times CU (\text{мкА})$
Собственная индуктивность (ESL), $L_c$	Примерно 20 нГн; у конденсаторов $d \geq 64,3$ мм с пониженной индуктивностью $\approx 13$ нГн	22–23 нГн
ESRmax (100 Гц, 20 °С)	9–220 мОм	5–95 мОм
Импеданс Z (10 кГц, 20 °С)	9–190 мОм	10–100 мОм
Допустимый ток пульсации, $I_{\sim} R$ (В) (100 Гц, 85 °С, при базовом охлаждении). Максимальный ток пульсации, (85 °С/120 Гц)	8,2–58 А	5,8–47,3 А
Диапазон рабочих температур (согласно IEC 60068-1)	$U_n \leq 400$ В; $-40/+85$ °С $U_n = 400$ В; $-25/+85$ °С	$-40/+85$ °С
Срок службы	85 °С; $U_n$ ; $I_{\sim} R > 12 000$ ч. 40 °С; $U_n$ ; $1,5 \times I_{\sim} R > 250 000$ ч.	12 000 ч (при 85 °С)
Размеры цилиндрического корпуса (диаметр×высота), мм	51,6×80,7; 51,6×105,7; 64,3×105,7; 76,9×105,7; 76,9×143,2; 76,9×220,7; 91,0×144,5; 91,0×226,3	51×75; 51×96; 51×115; 51×130; 64×96; 64×115; 64×130; 64×155; 77×96; 77×115; 77×130; 77×155; 90×157; 90×196; 90×236
Масса, кг	0,22–1,9	0,27–2,3

Примечание:

\* Винтовые (M5×8, M6×12) зажимы выводов. Конденсаторы серии В43456 крепятся хомутами, а В43458 — торцевым болтом (M12×17) днища.

\*\* Винтовые (M5×10, M6×12) выводы. Конденсаторы конфигурации В крепятся торцевым болтом днища, N — держателем и прижимным фланцем, Y — кронштейном с двойной втулкой.



Рис. 3. Внешний вид конструкции блока ЭК трехфазного IGBT-инвертора единичного модуля SEMIKUBE (выходная мощность до 900 кВт) компании SEMIKRON

крепящихся хомутами ЭК в корпусе диаметром  $> 64,3$  мм на две теплопроводящие прокладки, одна из которых заполняет воздушный зазор, а другая, изолирующая, перекрывает все днище конденсатора, обеспечивает требуемую (до 2,5 кВ) электрическую прочность соединения [2]. В результате тепловое сопротивление (К/Вт) между основанием корпуса и охлаждаемым радиатором (рис. 2) снижается на 84–87%, позволяя увеличить импульсную токовую нагрузку ЭК и степень заполнения объема вентилируемого блока (рис. 3) сглаживающего звена ПЧ. Соотношение разности температур корпуса ЭК и окружающей среды при естественной —  $\Delta T$  и принудительной  $\Delta T^*$  вентиляции приведены в таблице 2. В среднем, Hitachi AIC при скорости потока воздуха  $\geq 1,0$  м/с допускает увеличение  $I_{\sim}$  на 10% [3], а Epcos AG приводит максимальные значения —  $I_{\sim} \text{max}$  для каждой серии ЭК повышенной мощности, соразмерные диаметру корпуса [2].

**Таблица 2.** Типичные соотношения температур принудительно вентилируемого корпуса ЭК повышенной мощности и окружающей среды [2]

Скорость потока воздуха, м/с	Значение $\Delta T/\Delta T^*$
0,5	0,55
1,0	0,45
1,5	0,39
2,0	0,35

Температурное ограничение (1), накладываемое  $I\sim R$ , вынуждает параллельно подключать на DC-шины ПЧ несколько ЭК. При этом итоговое увеличение емкости сглаживающего звена ЭК определяется именно данным условием, а не обеспечением требуемого коэффициента пульсаций, характеризующего степень выпрямления напряжения питания ПЧ. С другой стороны, недостаточно высокое (сравнительно с рабочим напряжением DC-шины силовых преобразователей) номинальное напряжение  $U_n$  (табл. 1) современных ЭК (не превышающее у серийно выпускаемых изделий 500–550 В [2, 3]) заставляет прибегать к их последовательному соединению, особенностью которого является необходимость установки специальных балластных резисторов с короткими ленточными выводами под винт (табл. 3) для выравнивания перекоса напряжений из-за разницы  $I_L$  отдельных конденсаторов. Сопротивление балластного резистора  $R$  (табл. 3) можно рассчитать по формуле, выведенной на основании соотношения для  $I_L$  [1]

$$R = 1000 / (0,015 \times C_n),$$

где  $C_n$  — номинальная емкость ЭК (мкФ). Протекающий через балластный резистор уравнивающий ток должен превышать зависящий от условий эксплуатации  $I_L$  (табл. 1) в 10–20 раз, вследствие чего на балластных резисторах рассеивается значительная мощность [1], а энергетический КПД сглаживающего звена ПЧ существенно снижается.

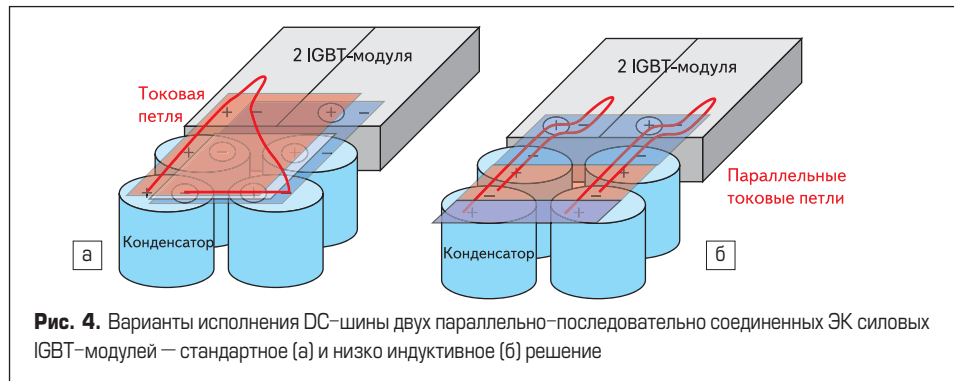
Схемотехника мощных высоковольтных ПЧ предусматривает размещение последовательно-параллельно соединенных ЭК на DC-шине (например, разработанные SEMIKRON DC-шины SKCB, где в различных конфигурациях число конденсаторов емкостью 2200–4700 мкФ варьируется от 48 до 72 [4]). Подобная комбинированная схема сглаживающего звена, за счет индуктивности соединительных проводов, увеличит паразитную индуктивность DC-шины  $L_{ш}$ , что повысит коммутационные перенапряжения ( $du/dt$ ), одновременно индуцируемые на переход «эмиттер–коллектор» закрывающегося транзистора IGBT-модуля и блок ЭК [4]. Учитывая небольшую диэлектрическую прочность тонкого слоя оксида алюминия и разброс номиналов емкостей, это может привести к внутреннему короткому замыканию ЭК. Сокращение в суммарной величине  $L_{ш}$  составляющей блока ЭК производится двумя путями:

- топологией соединения с DC-шиной проводников сглаживающего звена;
  - снижением собственной индуктивности (self-inductance)  $L_c$  конденсаторов (табл. 1).
- Концепция дизайна низко индуктивной многослойной DC-шины, предлагаемая

**Таблица 3.** Технические параметры балластных резисторов производства Hitachi AIC [3]

Рассеиваемая мощность, Вт	Номинальное сопротивление, кОм*	Геометрические размеры, мм							
		Корпус			Выводы				
		длина	ширина	высота	длина	ширина	толщина	диаметр отверстия	межосевое расстояние между отверстиями
5	0,1–51	35±1,5	9,5±1	9,5±1	12,5	8	0,5	6	22±1
7	0,2–100	48±1,5	9,5±1	9,5±1	12,5	8	0,5	6	28,6±1
7	0,2–100	48±1,5	9,5±1	9,5±1	12,5	8	0,5	6	32±1
10	0,2–150	48±1,5	12,5±1	12,5±1	12,5	8	0,5	6	28,6±1
10	0,2–150	48±1,5	12,5±1	12,5±1	12,5	8	0,5	6	32±1
15	0,51–200	48±1,5	12,5±1	12,5±1	12,5	8	0,5	6	32±1
20	0,51–240	63,5±1,5	12,5±1	12,5±1	13±1,5	8	0,8	6	32±1

Примечание: \* допустимое отклонение сопротивления при коде H — ± 3%, J — ± 5%, K — ± 10%.



**Рис. 4.** Варианты исполнения DC-шины двух параллельно-последовательно соединенных ЭК силовых IGBT-модулей — стандартное (а) и низко индуктивное (б) решение

компанией SEMIKRON (рис. 4), предусматривает:

- индивидуальное подключение групп конденсаторов к IGBT-модулям инвертора ПЧ;
- предельное уменьшение площади токовой петли, паразитная индуктивность которой оценивается в пропорции  $1 \text{ см}^2 = 10 \text{ нГн}$ ;
- монтаж проводников подключения групп параллельно-последовательно соединенных конденсаторов сглаживающего звена по траектории протекания основного тока DC-шины, без петель и с наименьшим количеством пересечений.

Благодаря модернизации формы выводов активной части ЭК [5] — специального изгиба, сократившего промежуток «обкладка–корпус» и расстояние между выводами при одновременном уменьшении (на 4 мм) длины резьбы винтовых зажимов, компании Ercos AG удалось в 1,3–1,5 раза (до 10 нГн) снизить величину  $L_c$  и импеданс  $Z$  (табл. 1), равный [2]

$$Z = \sqrt{\left(\frac{tg\delta}{\omega C_n}\right)^2 + \left(\omega L_c - \frac{1}{\omega C_n}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\omega$  — угловая частота цепи включения конденсатора. Равнозначно изменению  $Z$  (2) меняется и резонансная (serial resonance) частота конденсатора —  $f_{res} = 1/2\pi\sqrt{L_c \times C_n}$ .

Совершенствование технических характеристик силовых металлопленочных конденсаторов на основе структурированного непольярного диэлектрика — полипропилена, применяемых в цепях фильтрации выпрямленного тока (DC-конденсаторов), открыла возможность разработки компактных сглаживающих звеньев для стремительно развивающегося рынка мощных высоковольтных ПЧ [1]. В частности, удельная энергоемкость (запасаемая энергия) металлопленочных конденсаторов увеличилась в 2–3 раза, достигнув

уровня порядка 1000 Дж/дм<sup>3</sup> для конденсаторов с малой наработкой и 200 Дж/дм<sup>3</sup> для конденсаторов с наработкой в десятки тысяч часов. Во многом это обусловлено совершенствованием технологии формирования слоя металлизации электродов, включающего:

- неравномерное распределение толщины, позволяющее повысить допустимую токовую нагрузку за счет смещения наиболее нагретой точки (hot spot) из центральной в периферийную область активной части конденсатора;
- сегментацию поверхности, снижающую риск возникновения невосстанавливаемого пробоя, ведущего к короткому замыканию обкладок [4];
- усиление торцевого (преимущественно цинкового) контактного слоя напыления выводов секции (шоопирование), повышающее устойчивость к пульсациям тока и минимизирующее краевой эффект (pinch effect) — концентрацию (самостягивание) заряда, вызванную искривлением электромагнитного поля на краях электродов.

По сравнению с ЭК (табл. 1) сглаживающие DC-конденсаторы имеют пониженные значения  $ESR$  и  $ESL$ , следовательно, способны работать без ухудшения характеристик инвертора при гораздо больших диапазонах  $I\sim R$ , с меньшим значением  $C_n$ , высокой постоянной времени саморазряда (табл. 4) и малой абсорбцией заряда. Кроме того, уровень их единичной величины  $U_n$  и  $C_n$  (табл. 4) позволяет предельно сократить количество соединений и габариты блока конденсаторов DC-шины [1]. По аналогии с ЭК (1), значение  $T_{max}$  будет пропорционально  $P_{внутр.}$  (сумме потерь в слое металлизации и диэлектрике), определяемой по формуле [8]

$$P_{внутр.} = I\sim^2 \times ESR + \hat{u}^2 \times \pi f_0 \times C_n \times tg\delta_0, \quad (3)$$

где  $\hat{u}$  — пиковое значение напряжения на частоте пульсации  $f_0$ , приложенного к конденса-

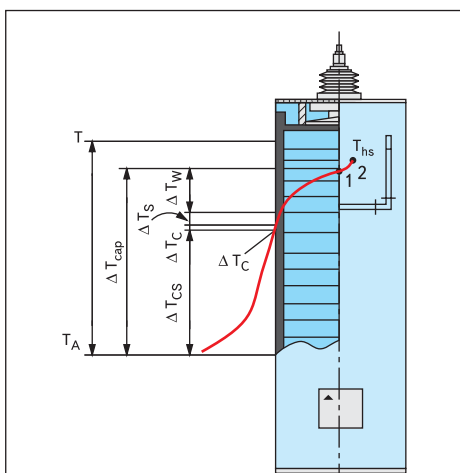
тору напряжения. Характер изменения  $T_{\max}$  для DC-конденсатора в прямоугольном стальном корпусе [8] приведен на рис. 5. Смещение наиболее нагретой точки с геометрической оси (точка 1) в точку 2 (рис. 5) — ближе к выводам активной части — позволит увеличить температурный градиент —  $\Delta T_{\text{ср}}$ , повысив тем самым термическую устойчивость конденсатора.

Температурный профиль  $\Delta T$  поперечного слоя металлизации при равномерной и неравномерной толщине напыления [4] рассчитывается по выражению:

$$\Delta T = -Q/k, \quad (4)$$

где  $Q$  — тепловыделение активной части конденсатора (Вт/с), пропорциональное омическим потерям в слое металлизации и узлах соединения обмоток;  $k$  — теплопроводность выводов. Если на некотором промежутке времени принять  $Q = \text{const}$ , распределение экстремумов температуры — производной  $dT/dx$  (4) — будет соответствовать конфигурации слоя напыления металлизации МКК DC-конденсатора [8].

Многослойная пакетная или рулонная укладка пленки предусматривает разбивку одной из поверхностей металлизации электродов МКК DC-конденсатора на отдельные равномерные ( $\approx 1 \text{ см}^2$ ) сегменты, соединенные между собой токовыми коридорами. Функционально это эквивалентно матрице плавких вставок параллельных пакетов набора секций высоковольтных силовых конденсаторов, наиболее эффективно локализуя место пробоя в конденсаторах большой единичной мощности при процессе самовосстановления [4].



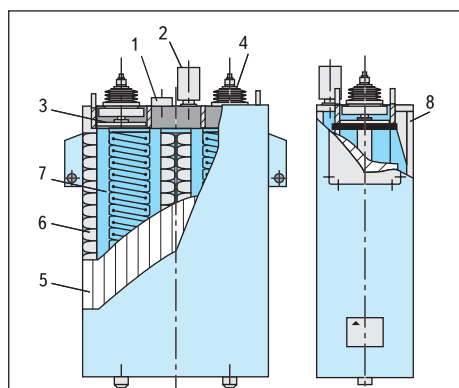
**Рис. 5.** Вид температурной кривой вертикально расположенного прямоугольного МКК DC-конденсатора серии B25650.  
 $\Delta T_{\text{ср}}$  — температурный градиент наиболее нагретой точки;  
 $\Delta T_W$  — отклонение температуры между внутренними сторонами волновой кромки противоположных усиленных краев секции;  
 $\Delta T_S$  — разность температур внутренней и внешней стороны волновой кромки;  
 $\Delta T_{CS}$  — изменение температуры корпуса относительно окружающей среды;  
 $T_{hs}$  — температура наиболее нагретой точки;  
 $T_A$  — температура окружающей среды;  
 $T_C$  — температура стенки корпуса

**Таблица 4.** Основные технические параметры металлопленочных DC-конденсаторов (стандарты IEC 1071, EN 61071, VDE 0560-120/121 [6, 7])

Параметр	Диапазон значений	
	серия B25650 EPCOS AG	серия E63.XXX ELECTRONICON Kondensatoren GmbH
Технологическое исполнение	МКК, газовое N2/SF6 заполнение	МКР, заполнение органическим маслом
Номинальное постоянное напряжение, $U_N$	700–6600 В	800–6300 В
Номинальная емкость, $C_N$	80–30 000 мкФ	0,5–1800 мкФ
Допустимое отклонение $C_N, \Delta C_N$	до $\pm 10\%$	$\pm 10\%$ или $\pm 5\%$
Запасаемая энергия, $W_N$	до 18 000 Втс	–
Максимальный среднеквадратичный ток, $I_{\text{макс}}$	30–950 А	10–100 А
Максимальный пиковый ток	до 10 кА	0,3–15 кА
Максимальные токовые броски, $I_s$	до 100 кА (200 А – 10 раз за период эксплуатации)	0,54–20 кА
Собственная индуктивность (ESL), $L_c$	от 40 до 100 нГн	–
Резонансная частота, $f_{\text{рез}}$	–	8,6–650 кГц
Тангенс угла потерь, $\text{tg}\delta$	$2 \times 10^{-4}$	
Эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), $R_s$	–	0,6–12 мОм
Тепловое сопротивление, $R_{\text{th}}$	–	1,0–16 К/Вт
Время саморазряда, $\tau = R_{\text{из}} \times C$	$\geq 10 000$ с	5000 с
Диапазон рабочих температур	–40/+85 °С	–40/+85 °С
Интенсивность отказов	300 за $10^7$ ч	–
Срок службы	100 000 ч	100 000 ч (при $T_{\text{макс}} \leq 65$ °С)

Примечание: конденсаторы B25650 выпускаются в стальном прямоугольном корпусе, конденсаторы E63.XXX — в алюминиевом цилиндрическом. При установке конденсаторов B25650 следует учитывать возможность расширения до 20 мм боковых поверхностей корпуса под действием избыточного давления.

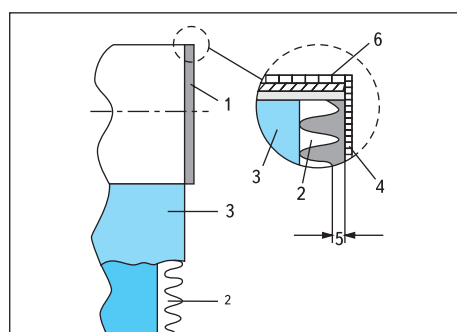
Высоковольтные DC-конденсаторы силовых шин питания ПЧ (табл. 4) выполняются по МКР-технологии: односторонне металлизированной ленты полипропиленовой пленки — PHD (high temperature polypropylene), вторая сторона которой выполняет функцию диэлектрической обкладки, укладываемой в спирально намотанные секции пакета (рис. 6) с небольшим равномерным смещением витков, и последующего заполнения объема корпуса инертным газом, органическим маслом или не-



**Рис. 6.** Конструкция МКК DC-конденсатора серии B25650.  
 1 — клапан предельного давления;  
 2 — контактный датчик давления;  
 3 — размыкатель выводов, срабатывающий при превышении избыточного давления внутри корпуса;  
 4 — проходной пластиковый изолятор вывода;  
 5 — изолирующий кожух;  
 6 — продольный срез плоских обмоток набора пакета;  
 7 — шина соединения электродов обмоток секций с выводами конденсатора;  
 8 — прямоугольный стальной корпус

токсичным — не содержащим подлежащего обязательной утилизации полихлорированного бифенила PCB (PolyChlorinated Biphenyls) компаундом. Применяемая Epcos AG технология МКК (Metallized Kunststoff Kompakt — разновидность технологии МКР [4]) — предусматривает, помимо усиления слоя металлизации на торцах обмоток секций, расширение площади контактной поверхности выводов конденсатора за счет сочетания ровного и волнового среза кромок пленки (рис. 7).

Для сглаживания пульсаций цепи постоянного тока IGBT-инверторов выпускают пленоч-



**Рис. 7.** Исполнение контактной зоны ввода пакета секции МКК-конденсатора.  
 1 — упрочненное напыление торца обмотки секции;  
 2 — свободная от металлизации часть пленки кромки волнового среза;  
 3 — сплошной слой металлизации обкладки с ровным срезом края;  
 4 — расширенная контактная поверхность ввода;  
 5 — наименьшая толщина контактной зоны;  
 6 — вид контактной зоны усиленного края металлизации обкладок без волнового среза (технология МКР)



ные DC-конденсаторы, как традиционного исполнения (табл. 4), так и специальных серий, например PCC HP (Power Capacitor Compact High Power), с компактной плоской намоткой катушек, интегрируемые непосредственно в пределы геометрических размеров конкретных силовых IGBT-модулей ПЧ ведущих фирм-производителей [4].

Одной из основных проблем применения высоковольтных силовых IGBT-модулей является обеспечение мягкого управляемого переключения, поскольку совокупность высокого напряжения (кВ), большого тока (тысячи А) и паразитных индуктивностей рассеяния приводит к перенапряжению и увеличению вероятности возникновения колебательных процессов при переключении. Поэтому, в связи с прослеживающейся тенденцией роста номинальной мощности (десятки МВт) и перехода ПЧ в кВ диапазон напряжений, требования к конденсаторам звена постоянного тока непрерывно ужесточаются.

#### Литература

1. Колпаков А. И. Расчет конденсаторов шины питания мощных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии. 2004. № 2.
2. Aluminum Electrolytic Capacitors. Published by Epcos AG. Ordering No. EPC: 27009-7600. Germany. 2002.
3. Hitachi AIC. Compact Aluminum Electrolytic Capacitors. Edition 2005.
4. Шишкин С. А. Силовые конденсаторы Epcos AG для IGBT-инверторов мощных преобразователей систем электроснабжения // Силовая электроника. 2005. № 3.
5. Inductance halved, costs cut // Epcos components. 2004. № 4.
6. Power Capacitors. Published by Siemens Matsushita Components GmbH & Co. Ordering No B426-P2612-X-X-7600. Printed in Germany. 1999.
7. Capacitors for Power Electronics // <http://electronicon.com>
8. Vetter H. Link circuit design with dry MKK capacitors // Siemens Components. 1997. № 5.