

Силовые конденсаторы EPCOS AG

для IGBT-инверторов мощных преобразователей систем электроснабжения

Любой конденсатор — элемент электрической цепи, предназначенный для использования его емкости, обладает набором потребительских свойств, определяемых совокупностью параметров эквивалентной схемы. Хотя история существования данного устройства и насчитывает более двух с половиной столетий, изготовить универсальный вариант конденсатора пока не удалось. Однако в силовом конденсаторостроении это не препятствует созданию все новых конструкций и специальных приложений, а также усовершенствованию исходных материалов. Сегодня на мировом рынке разработки и внедрения технологий пассивных электронных компонентов накопления электроэнергии компания EPCOS AG занимает лидирующие позиции.

**Сергей Шишкин,
к. т. н.**

shishkin53@mail.ru

Силовые конденсаторы оборудования систем электроснабжения, спроектированных на базе автономных инверторов напряжения и использующих в качестве элементов коммутации биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-инверторы), классифицируются по технологическим группам, согласно области возможного применения, режиму работы и особенностям конструкции. Проблема обеспечения надежности подобных энергосистем, обусловленная тенденцией роста их единичной мощности, включает требования, предъявляемые к топологии соединений блока накопительных конденсаторов и конфигурации снабберного (демпфирующего) звена IGBT-инвертора. Так, комплектная сборка 3-фазного преобразователя асинхронного генератора ветроэнергети-

ческой установки мощностью более 1 МВт содержит инвертор на интеллектуальных силовых модулях SkiiP (Semikron integrated intelligent Power) 240GB172 с транзисторами Trench IGBT (2400 В/1700 А) и монтируемый непосредственно на DC-шину встроенный блок SKCB электролитических конденсаторов (ЭК), снабженный балластными (выравнивающими) резисторами и снабберами [1]. Суммарная емкость последовательно-параллельного соединения ЭК, в зависимости от I_R — допустимого тока пульсации (табл. 1), составляет 1500–6300 мкФ, а число конденсаторов варьируется от 48 до 72 [1]. Оптимизировать схемное решение блока, сократив при этом количество выравнивающих резисторов, можно за счет установки конденсаторов больших номинальных емкостей и напряжений.

Известно, что в силовых цепях частоты IGBT-инвертора собственная индуктивность (ESL — Capacitor self-inductance) — L_c (рис. 1), и эквивалентное последовательное сопротивление (ESR — Equivalent series resistance) конденсатора должны быть как можно ниже, а значение I_R , с учетом коэффициентов температурной и частотной коррекции, — как можно выше.

Несколько серий технологического ряда алюминиевых электролитических конденсаторов EPCOS AG [2] с пониженным значением ESL (табл. 1) разработаны преимущественно для сглаживания пульсаций промежуточного напряжения постоянного тока мощных преобразователей [3]. Модернизируя конфигурацию выводов активной части — специальный изгиб, одновременно уменьшающий расстояние «обкладка — корпус», длину винтовых зажимов и промежуток между ними [3], удалось в 1,3–1,5 раза (табл. 1) сократить величину L_c и импеданс конденсатора — Z , равный [2, 3]:

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

Таблица 1. Основные технические параметры алюминиевых электролитических конденсаторов повышенной мощности производства «EPCOS AG», стандарт IEC 60384-4 [2]

Параметр	Значение	
	Серия V43456/V43458*	Серия V43560/V43580*
Номинальное напряжение, U_n	= 350, 400, 450 В	
Импульсное напряжение, U_{imp}	1,10 × U_n (при $U_n \geq 350$ В)	
Номинальная емкость, C_n	1000...18 000 мкФ	2200...15 000 мкФ
Допустимое отклонение C_n , ΔC_n	±20 % (код = M)	
Максимальный $tg\delta$ (100 Гц, 20 °С)	0,20	
Ток утечки, I_L (5 мин, при 20 °С)	$I_L \leq 0,3 \text{ мкА} (C_n \text{ мкФ} \times U_n \text{ В})^{0,7} + 4 \text{ мкА}$	
Собственная индуктивность, L_c	Примерно 20 нГн; у конденсаторов $d \geq 64,3$ мм с пониженной индуктивностью ≈ 13 нГн	$d = 51,6$ мм ≈ 15 нГн; $d \geq 64,3$ мм ≈ 20 нГн; у конденсаторов $d \geq 64,3$ мм, с пониженной индуктивностью ≈ 13 нГн
ESRmax (100 Гц, 20 °С)	9–220 мОм	12–69 мОм
Импеданс Z (10 кГц, 20 °С)	9–190 мОм	10–68 мОм
Допустимый ток пульсации, I_R (В) (100 Гц, 85 °С, при базовом охлаждении)	8,2...58 А	14...48 А
Диапазон рабочих температур (согласно IEC 60068-1)	$U_n \leq 400$ В; $-40/+85$ °С $U_n = 400$ В; $-25/+85$ °С	$-40/+105$ °С
Срок службы	85 °С; U_n ; $I_R > 12 000$ ч 40 °С; U_n ; $1,5 I_R > 250 000$ ч	105 °С; U_n ; $I_R > 6000$ ч 85 °С; U_n ; $I_R > 20 000$ ч 40 °С; U_n ; $2,2 I_R > 250 000$ ч

Примечание: * винтовые (M5, M6) зажимы выводов. Конденсаторы серии V43456, V43560 крепятся хомутами, а V43458, V43580 — болтовым соединением.

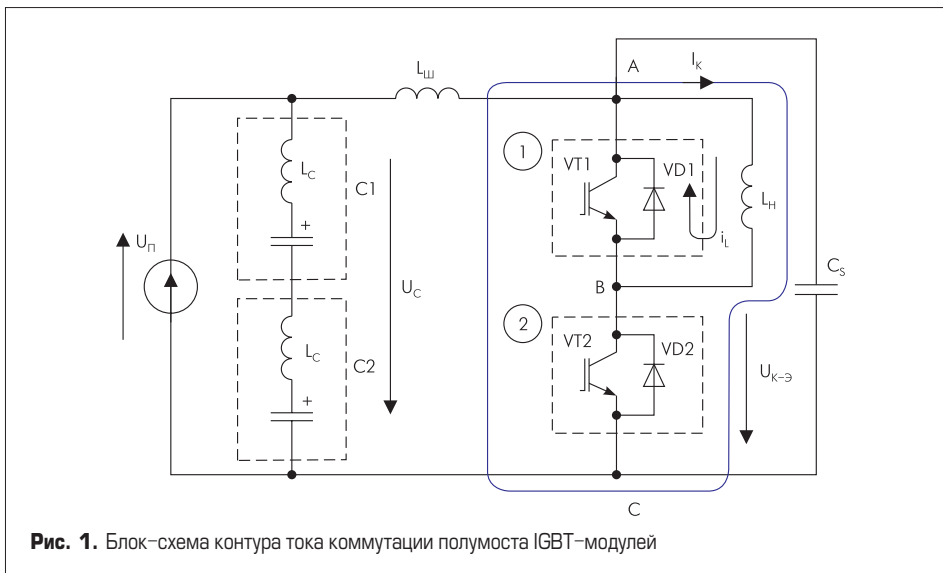


Рис. 1. Блок-схема контура тока коммутации полумоста IGBT-модулей

где $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь, C_n — номинальная емкость, ω — угловая частота цепи включения конденсатора.

Тепловая модель ЭК повышенной мощности (табл. 1) предусматривает преимущественную (80–85% от общего теплового баланса) продольную теплопередачу между основанием корпуса конденсатора и поверхностью монтажа (принудительно охлаждаемым радиатором). В результате уменьшения теплового сопротивления (К/Вт) данного соединения [2], можно повысить токовую нагрузку на ЭК и коэффициент заполнения объема блока SKCB.

При переключении транзисторов VT_1 , VT_2 силовых IGBT-модулей 1, 2 (рис. 1), из-за наличия L_c и $L_{ш}$ — паразитной индуктивности шин питания, высокая крутизна фронта di/dt (du/dt) коммутационных импульсов приводит к появлению переходного перенапряжения U_k , одновременно индуцируемого на блок электролитических конденсаторов U_c и переход «эмиттер — коллектор» закрывающегося транзистора VT_2 модуля 2 — $U_{к-э}$. Наложение амплитуды индуцированного коммутационного перенапряжения ΔU_m , рассчитываемой по выражению [3]:

$$\Delta U_m = (L_c + L_{ш}) \times \frac{\Delta I_k}{\Delta t}, \quad (2)$$

где $\Delta I_k/\Delta t$ — скорость изменения переходного тока при закрытии IGBT-транзистора, на напряжение питания — U_n силового модуля: $U_k = \Delta U_m + U_n$, способствует быстрому росту мощности рассеяния на переходе «эмиттер-коллектор», выходу из строя транзисторного ключа в процессе переключения и моментальному внутреннему короткому замыканию ЭК (рис. 1). В это время опосредованный индуктивностью нагрузки L_n , ток i_L замыкается через шунтирующий (опозитный) диод VD_1 модуля 1 и не влияет на величину переходного тока I_k в контуре коммутации (рис. 1). Вот почему в силовой цепи пакета шин питания преобразователя снижение индуктивности $L_k = L_c + L_{ш}$ (2) приобретает первостепенную значимость, но если $L_{ш}$ зависит от топологии силовых связей [1], то L_c полностью определяет Z (1) блока конденсаторов. Например, тестирова-

ние IGBT-модулей полумоста ступени инвертора (1700 В/300 А) после замены двух последовательно соединенных алюминиевых электролитических конденсаторов 6800 мкФ×400 В серии V43456 (L_c около 20 нГн) на идентичные по номиналу усовершенствованные образцы V43456-A9688-M (L_c до 10 нГн) показало в среднем снижение пиковых значений $U_{к-э}$ на 12%, а U_c — на 25% [3].

Простейший способ ограничения ΔU_m (2) — установка на шины питания IGBT-модулей (точки А, С — рис. 1) снабберных емкостей C_s , поглощающих до допустимого предела переходного перенапряжения ΔU_k , запасенную в L_k энергию W , соразмерную рабочему току I [1]:

$$W = \frac{L_k \times I^2}{2}.$$

Накопленная емкостью C_s энергия, численно равная W и пропорциональная квадрату абсолютной разности напряжений $U_k - \Delta U_k$, в паузы циклов коммутации сбрасывается на шину питания. Таким образом, по заданному уровню ΔU_k можно оценить требуемую номинальную емкость снабберного конденсатора [1]:

Таблица 2. Основные технические параметры снабберных конденсаторов производства «EPCOS AG», стандарт IEC 61071 [5]

Параметр	Значение					
	серия B32656S	серия B32686S				
Технологическое исполнение	МКР					
Номинальное напряжение, U_n (постоянное/переменное U_{rms} при $f \leq 1$ кГц)	850/450 В, 1000/480 В, 1250/500 В, 1600/750 В, 2000/800 В					
Номинальная емкость, C_n	0,047...2,2 мкФ					
Допустимое отклонение C_n , ΔC_n	$\pm 20\%$ (код = M); $\pm 10\%$ (код = K); $\pm 5\%$ (код = J)					
Максимальное значение $\operatorname{tg}\delta$ ($\times 10^{-3}$), при 20 °С	f , кГц	C_n , мкФ		1,0 (при 10 кГц) 3,0 (при 100 кГц)		
		до 0,1 мкФ	0,1–1 мкФ		свыше 1 мкФ	
		1	–		0,5	0,5
		10	–		0,8	1,5
100	5,0	–	–	–		
Допустимый среднеквадратичный ток, I_{rms} на частоте 100 кГц	5...17 А					
ESR на частоте 100 кГц	3,5...35 мОм					
Скорость изменения напряжения, du/dt	При $U_n = 850/450$ В – 400 В/мкс, 1000/480 В – 450 В/мкс, 1250/500 В – 500 В/мкс, 1600/750 В – 600 В/мкс, 2000/800 В – 700 В/мкс					
Диапазон рабочих температур (согласно IEC 60068-1)	–55/+100 °С					

$$C_n \approx L_k \times \left(\frac{\Delta I_k}{\Delta U_k} \right)^2,$$

подключение которой одновременно не должно вызвать генерации добавочного сигнала при последовательном соединении с L_k в контуре тока коммутации (рис. 1). В схемах мощных IGBT-инверторов, составленных из комбинации одиночных силовых модулей, на DC-шине питания устанавливается несколько снабберов [1]. Необходимая высокая скорость отклика перезаряда (изменения напряжения) конденсатора снабберного звена — du/dt (табл. 2), определяемая частотой переключения транзисторных ключей (соразмерной длительности импульса формируемого IGBT-инвертором), обеспечивается минимизацией собственной индуктивности, низким ESR (табл. 2), а также, как отмечено выше, максимально близким расположением к силовому модулю.

Заключенные в пластиковый корпус прямоугольной формы и герметизированные нетоксичным компаундом (UL94V0), снабберные конденсаторы EPCOS AG (табл. 2) выполнены по рулонной МКР-технологии (односторонне металлизированной полипропиленовой пленки). Причем при необходимости увеличения C_n в конденсаторе параллельно объединяется до четырех цилиндрических обмоток [4] или используется MFP-технология (односторонняя металлизация пленки + фольга) с последовательным внутренним соединением пары обмоток [5]. Восемь геометрических модификаций крепежных выводов конденсаторов различных номиналов адаптированы к креплению на шины IGBT-модулей производства EUPEC, Fuji Electric Device Technology, SEMIKRON, Toshiba Corporation [4], Mitsubishi Electric, ОАО «Электровыпрямитель».

До последнего времени высокая удельная мощность (1000–10 000 Вт/кг) обеспечивала практически безальтернативное применение ЭК в блоках накопителей мощных преобразователей. Совершенствование свойств полимерных пленок в сочетании с новыми тех-

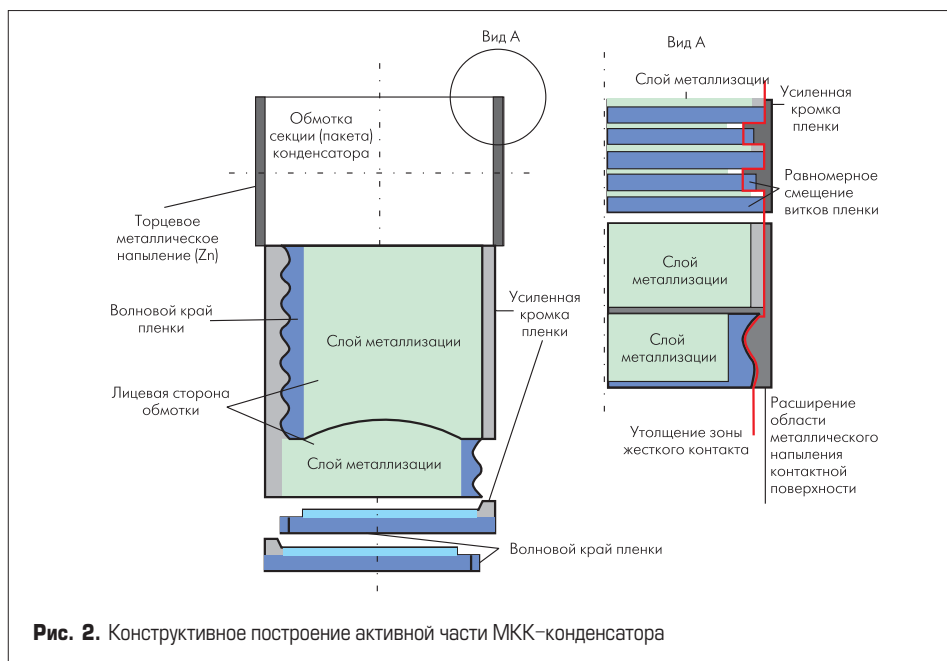


Рис. 2. Конструктивное построение активной части МКК-конденсатора

нологиями производства силовых металлопленочных конденсаторов, в том числе запатентованной EPCOS AG МКК-технологии (рис. 2) — одновременного расширения и повышения прочности контактной поверхности выводов слоя металлизации обкладок, за счет сочетания ровного и волнового среза кромок пленки, уложенной с небольшим равномерным смещением витков [6, 7], — нарушило эту тенденцию.

По сравнению с ЭК неполярные пленочные МКК-конденсаторы, работающие на постоянном напряжении, намного более устойчивы к пульсирующим и импульсным составляющим выпрямленного тока, имеют гораздо лучшие массогабаритные (устраняется необходимость в последовательном соединении конденсаторов) и энергетические (отсутствие выравнивающих резисторов, меньшее значение $\text{tg}\delta$) параметры [2, 6, 7, 8]. Усиленная кромка цинкового напыления торцов слоя металлизации (рис. 2), к которой припаиваются выводы конденсатора, минимизирует действие краевого эффекта (pinch effect) — скопление точечных зарядов на периферийных частях электродов, увеличивающих эндемическую напряженность E электрического поля у края обкладок. В случае пробоя диэлектрика мгновенная концентрация в месте дефекта энергии заряда конденсатора

$$W_{\text{н}} = \frac{C \times U^2}{2}$$

(табл. 3) вызовет резкое повышение температуры (до 6000 К) и давления, инжекцию плазмы и образование на месте пробоя изоляционной области — так называемое свойство самовосстановления (self-healing), сохраняющее работоспособность конденсатора [6]. Многослойная пакетная или рулонная укладка пленки (рис. 3) предусматривает разбивку одной из двух поверхностей металлизации электродов на отдельные равномерные сегменты, соединяемые между собой несколькими перемычками (токовыми коридорами). Функционально это эквивалентно матрице плавких вставок пакета параллельного набора секций

высоковольтных силовых конденсаторов, наиболее эффективно локализуемых место пробоя в конденсаторах большой единичной мощности (табл. 3) при лавинообразном процессе самовосстановления. Радиус R (рис. 3) сопряжения углов периметра емкостного сегмента способствует равномерной плотности распределения заряда. Симметричное продольное разграничение сегментированного слоя металлизации ровной полимерной пленки (рис. 3) позволяет сформировать относительно обкладки электрода со сплошным слоем металлизации и волновым срезом края плоско сложенных последовательно соединенных емкостных пакета, попарно перераспределяющих приложенное к выводам конденсатора напряжение $U_{\text{н}}$, снижая таким образом значение L_c (табл. 3). Кроме того, поскольку одновременный пробой в двух пакетах конденсатора мало вероятен, при каждом пробое одного из пакетов последовательное сопротивление второго будет ограничивать величину разрядного тока. Плоская поверхность многослойных обкладок емкостного пакета обеспечивает разнообразие композиции корпуса [6, 7].

Для сглаживания пульсаций цепи постоянного тока IGBT-инверторов компания EPCOS AG выпускает пленочные DC-конденсаторы (табл. 3), как традиционного исполнения — в прямоугольном металлическом корпусе, на котором расположены два проходных изолятора штыревых выводов (B25650), так и специальных серий — PCC LP (Power Capacitor Chip Low Power) и PCC HP (Power Capacitor Compact High Power), адаптируемые к конкретному варианту построения преобразователя, вплоть до интеграции непосредственно в конструкцию IGBT-инвертора [6, 7].

В системах электроснабжения промышленной частоты (50 Гц) совокупность требований синусоидальности напряжения и формирующего его меандр дискретного спектра импульсов различной длительности, генерируемого IGBT-инвертором, обеспечивается установкой выходного LC-фильтра. Искажения синусоидальности формы выходного сигнала, обусловленные крутизной фронта чередующихся

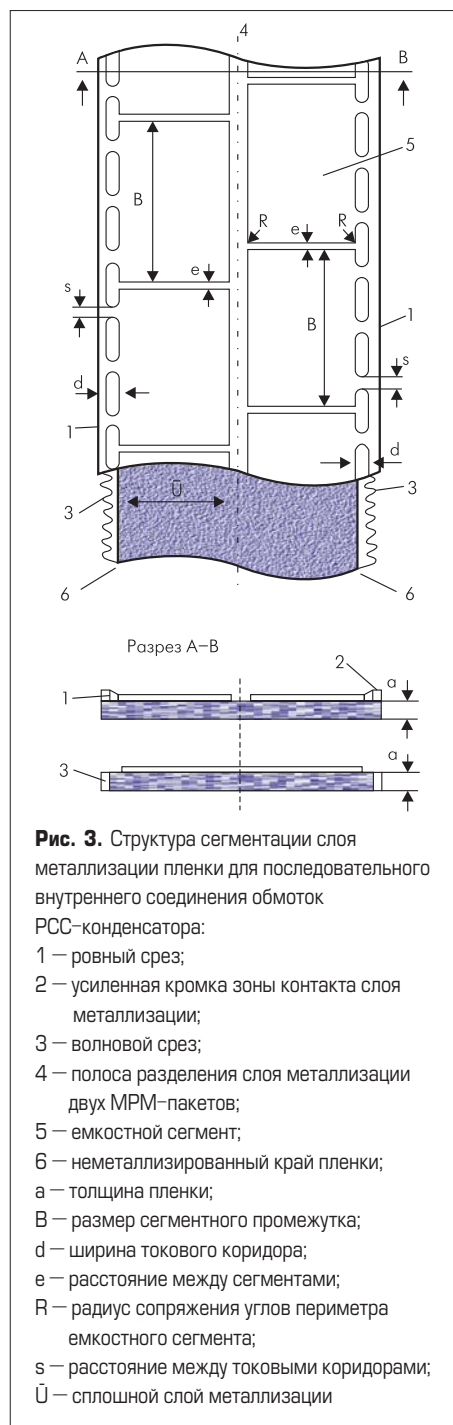


Рис. 3. Структура сегментации слоя металлизации пленки для последовательного внутреннего соединения обмоток PCC-конденсатора:

- 1 — ровный срез;
- 2 — усиленная кромка зоны контакта слоя металлизации;
- 3 — волновой срез;
- 4 — полоса разделения слоя металлизации двух МРМ-пакетов;
- 5 — емкостной сегмент;
- 6 — неметаллизированный край пленки;
- a — толщина пленки;
- B — размер сегментного промежутка;
- d — ширина токового коридора;
- e — расстояние между сегментами;
- R — радиус сопряжения углов периметра емкостного сегмента;
- s — расстояние между токовыми коридорами;
- U — сплошной слой металлизации

импульсов широтно-импульсной модуляции — du/dt , активируют выброс пиков — $I_{\text{п}} = C \times (du/dt)_{\text{макс}}$, и появление экстремумов — $I_{\text{а}} = C \times du/dt$ [8] высокочастотных гармонических составляющих тока нагрузки, которые поглощаются конденсаторами схемы фильтрации, вызывая их повышенный нагрев. Хорошая внутренняя теплопроводность AC-конденсаторов (табл. 4), использующих МКК-технологии построения активной части — двухсторонне металлизированную конденсаторную бумагу, пропитку минеральным маслом и изоляцию электродов пропиленовой пленкой [8], а также стабильность контакта торцевого слоя с бумагой (известную по технологии МР — «металл — бумага»), гарантирует импульсную прочность. Слои конденсаторной бумаги обеспечивают высокое качество пропитки, при этом ее пористая структура способствует равномерности распределения продуктов разложения, образующихся на месте про-

Таблица 3. Основные технические параметры пленочных DC-конденсаторов B25650 — стандарты IEC 1071-1/2, EN, VDE 0560 часть 120, 121 [8] и PCC для IGBT-преобразователей стандарты IEC 1071-1, NFF-16-101/102, IEC 68 [6, 7] производства «EPCOS AG»

Параметр	Значение		
	тип B25650	тип PCC HP	тип PCC LP
Технологическое исполнение	МКК		
Номинальное постоянное напряжение, U_n	700...6600 В	900...6600 В	100...600 В
Номинальная емкость, C_n	80...30 000 мкФ	< 10 000 мкФ	< 4000 мкФ
Допустимое отклонение $C_n, \Delta C_n$	до $\pm 10\%$	$\pm 10\%$ или $\pm 5\%$	
Номинальная энергия, W_n	до 18 000 Вт·с	500–3500 Вт·с	50–800 Вт·с
Номинальный ток, I_n (в зависимости от C_n и типа вывода), для B25650 — I макс.	30...950 А	до 300 А	до 400 А
Номинальный среднеквадратичный ток, I_{rms} (в зависимости от системы охлаждения и диэлектрика)	–	до 300 А	до 250 А
Допустимый пиковый ток, I_p	< 10 кА	< 200 кА	< 100 кА
Собственная индуктивность, L_c	До 100 нГн	10–56 нГн	5–30 нГн
Тангенс угла потерь, $\text{tg}\delta$	2×10^{-4}		$2-50 \times 10^{-4}$
Постоянная времени саморазряда, τ	$R_{из} \times C \geq 10\,000$ с		
Диапазон рабочих температур	–40/+85 °С		–40/+125 °С
Интенсивность отказов	300 за 10^7 ч		
Срок службы	100 000 ч	< 100 000 ч	

боя металлизированного покрытия в процессе самовосстановления. Выбор диэлектрической системы определил и конструктивную форму конденсаторов (табл. 4) — цилиндрическую. Встроенное устройство аварийного отключения токовой цепи предотвращает разрыв алюминиевого корпуса при превышении избыточного внутреннего давления [8]. Практика эксплуатации показала надежность работы в выходных фильтрах IGBT-инверторов AC-конденсаторов, выполненных по МКВ-технологии.

Линейка силовых конденсаторов, выпускаемых компанией EPCOS AG, не исчерпывается представленным материалом. Вне рамок статьи остались группы силовых конденсаторов, используемые в тиристорных частотно-регу-

лируемых электроприводах и управляемых выпрямителях, установках компенсации реактивной мощности, импульсных генераторах, источниках бесперебойного питания.

Литература

1. Колпаков А. Многослойная шина и модули SEMISTACK от SEMIKRON // Силовая электроника. № 1'2004. С. 32–36.
2. Aluminum Electrolytic Capacitors. Published by EPCOS AG. Ordering No. EPC: 27009-7600. Germany. 2002. 521 p.
3. Roumen J., Will N. Simplifying frequency converter design // Components focus power supplies. Published by EPCOS AG. Ordering N EPC: 50120-7600. N 1'2002. P. 17–19.

Таблица 4. Основные технические параметры пленочных AC-конденсаторов производства «EPCOS AG», стандарты IEC 1071-1/2, EN 61071-1/2, VDE 0560 часть 120, 121 [8]

Параметр	Значение	
	тип B25832	тип B25834
Технологическое исполнение	МКВ	
Номинальное напряжение, U_n /максимальное повторяющееся пиковое напряжение, U /максимальный бросок напряжения, U_s	640, 930/800, 200/1100, 1600	500...2100/630...2600/860...3600
Номинальная емкость, C_n	1,0–50 мкФ	0,1–220 мкФ
Допустимое отклонение $C_n, \Delta C_n$	$\pm 10\%$	для $C_n < 1,0$ мкФ $\pm 20\%$; для $C_n > 1,0$ мкФ $\pm 10\%$
Максимальный среднеквадратичный ток, I_{max}	10–18 А	10–80 А
Максимальный повторяющийся пиковый ток, I_p	25–800 А	50–5000 А
Максимальный бросок тока, I_s	60–2000 А	120–12 500 А
Последовательное сопротивление (20 °С), R_s	5,9–54 мОм	1,2–33 мОм
Собственная индуктивность, L_c	50–140 нГн	50–220 нГн
Тангенс угла потерь диэлектрика, $\text{tg}\delta$	2×10^{-4}	$2...50 \times 10^{-4}$
Постоянная времени саморазряда, τ	$R_{из} \times C \geq 10000$ с	
Диапазон рабочих температур	–55/+85 °С	
Интенсивность отказов	300 за 10^7 ч	
Срок службы	30000 ч	100000 ч

4. Snubber series for IGBTs. // EPCOS COMPONENTS. N 1'2004. P. 65.
5. Film Capacitors. Published by EPCOS AG. Ordering N EPC: 60007-7600. Germany. 2004. 404 p.
6. PCC HP High-Power Capacitors for Heavy-Duty Applications. Product Profile 2000. Published by EPCOS AG. Ordering No EPC: 26005-7600. Germany. 2000. 13 p.
7. PCC LP Power Capacitor Chip for Low-Power Inverter Applications. Product Profile 2002. Published by EPCOS AG. Ordering N EPC: 26009-7600. Germany. 2002. 9 p.
8. Power Capacitors. Published by Siemens Matsushita Components GmbH&Co. Ordering N B426-P2612-X-X-7600. Printed in Germany. 1999. 357 p.