

# Силовые компактные конденсаторы для мощных преобразователей

**Компания Epcos разработала конденсаторы серии PCC-HP (Power Chip Capacitor High Power) — новое поколение силовых конденсаторов, основанных на технологии МКК — металлизированная пленка, компактный, легкий, сухой дизайн.**

**Харальд Феттер**

Harald.Vetter@epcos.com

**Перевод: Олег Гнеушев**

Oleg.Gneushev@siemens.com

Конденсаторы цепи постоянного тока являются ключевыми компонентами при разработке мощных преобразователей. Новое поколение полупроводниковых приборов IGBT устанавливает более высокие стандарты электрических свойств силовых конденсаторов. Замена ГТО ключей на полупроводниковые приборы современных технологий также ставит новые высокие требования к качеству силовых конденсаторов. Например, собственная индуктивность конденсаторов должна быть снижена в десять раз по сравнению с конденсаторами, применявшимися в прошлом поколении преобразователей, чтобы снизить уровень коммутационных перенапряжений при возросшей скорости переключений. Допустимые для конденсаторов уровни температурных и токовых пиков также должны быть увеличены вдвое по сравнению с конденсаторами, применявшимися в тиристорных преобразователях.

Для обеспечения соответствия этим требованиям компания Epcos разработала силовые конденсаторы серии PCC-HP (Power Chip Capacitor High Power) — новое поколение силовых конденсаторов, основанных на технологии МКК (металлизированная пленка, компактный, легкий, сухой дизайн), уже успешно работающих в многочисленных транспортных системах [1].

Требуемая нагрузочная способность по току и индуктивность цепи обеспечиваются размещением модуля конденсатора PCC-HP непосредственно на шины преобразователя. Эти новые возможности конденсаторов PCC-HP позволяют применять их в широком диапазоне мощных преобразователей.

Новая концепция управления позволяет снизить необходимый уровень емкости конденсаторов звена

постоянного тока при одновременном увеличении токовой нагрузки. Эта тенденция приводит к использованию пленочных конденсаторов, таких как PCC-HP, в применениях, где до сих пор традиционно использовались электролитические конденсаторы [2].

## Требования, предъявляемые транзисторами IGBT

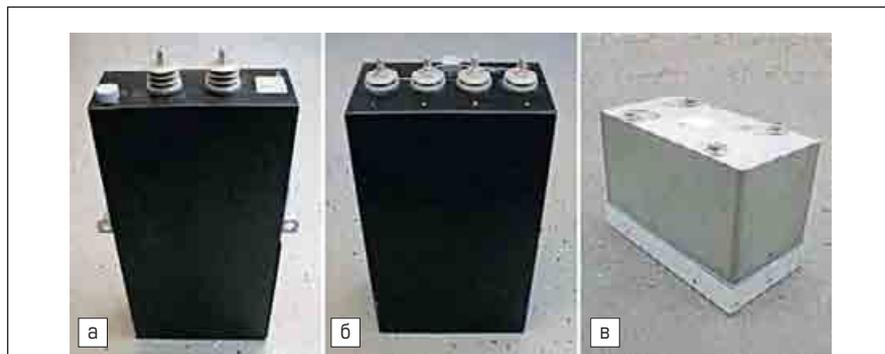
При разработке преобразователя на транзисторах IGBT особое внимание должно быть направлено на обеспечение низкого уровня индуктивности контура ( $L_{\sigma} < 100$  нГн) для минимизации коммутационных перенапряжений  $u_i$ , которые могут превысить допустимые уровни реверсивного напряжения IGBT приборов и привести к выводу из строя полупроводниковых ключей. Таким образом, многослойное расположение шин становится оптимальным решением для соединения IGBT модуля и конденсатора звена постоянного тока [3, 4]. Силовые модули IGBT также определяют геометрические размеры  $L \times W \times H$ , емкость  $C_R$  и собственную индуктивность  $L_{\sigma}$  конденсатора. Типичные требования для PCC-HP обобщены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры конденсатора	Требования IGBT
$U_{nr}$ , кВ	0,6–6,5
$C_{nr}$ , мФ	0,5–10,0
$I_{nr}$ , А/мкФ	0,1–0,5
$I_{cr}$ , А/мкФ	> 45
ESL, нГн	< 10–40
$du/dt$ , В/мкс	> 30

## Концепция PCC

Для современных мощных преобразователей компания Epcos разработала семейство силовых конденсаторов PCC-HP — новое поколение низкоиндуктивных, компактных, легких конденсаторов, производимых по технологии МКК. Для снижения индуктивности были сделаны значительные конструктивные усовершенствования (рис. 1). Необходимые нагрузочная способность и индуктивность контура были достигнуты путем модульного монтажа конденсатора PCC-HP непосредственно на шину (благодаря этому отпала необходимость в снабберных конденсаторах, подключаемых параллельно батарее). Это новшество применимо для широкого



**Рис. 1.** Эволюция снижения ESL: а) 1992: МКК-DC → ESL ≈ 400 нГн; б) 1995: МКК-DC → ESL ≈ 80 нГн; в) 2000: PCC-HP → ESL ≈ 30 нГн



Рис. 2. Выводы конденсатора слева направо: стандартные плоские выводы и специальные ножевые контакты [5, 6].

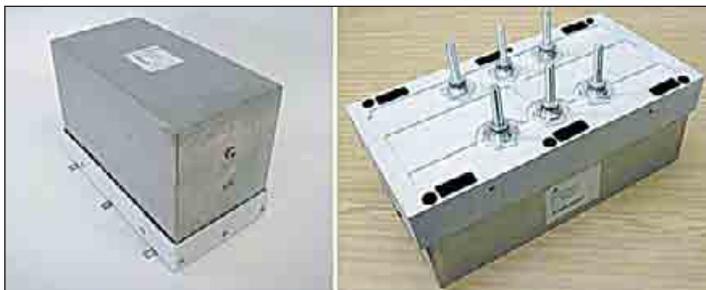


Рис. 4. Стандартный PCC-HP и оптимизированный для конкретного применения с 6 винтовыми терминалами



Рис. 3. Два конденсатора PCC-HP радиального исполнения с плоскими выводами и один стандартный, перевернутый выводами вверх конденсатор PCC-HP

диапазона преобразователей и обеспечивает оптимальную техническую и экономичную конструкцию преобразователя, отвечающую требованиям миниатюризации, стандартизации и модульности.

Технология изготовления конденсаторов МКК предполагает использование самовосстанавливающейся PP[PHD] пленки с напыленным структурированным металлизированным слоем алюминия или сплава Zn/Al. Металлизация выполнена неоднородно, она имеет утолщенную кромку. Волнообразная обрезка пленки по краю позволяет максимально увеличить площадь контакта при плоской намотке. Результатом применения такой технологии стала исключительная способность конденсаторов выдерживать мощные импульсы тока без проявления краевого эффекта (хорошо известный и опасный эффект, возникающий в месте соединения выводов и края обкладки конденсатора).

Технология PCC-HP унаследовала все лучшие свойства технологии МКК (табл. 2).



Рис. 6. Круглая, плоская и стэк-намотка для силовых конденсаторов

Таблица 2. Технические характеристики

Диапазон напряжения, $V_R$	900–6500 В пост. тока
Емкость, $C_R$	100–10 000 мкФ $\pm 10\%$
Ток RMS, $I_R$	до 400 А
Индуктивность, $L_{\sigma}$	15–50 нГн
Диэлектрические потери, $\tan \delta_0$	$2 \times 10^{-4}$
Импульсный ток, $I_s$	до 200 кА
Температурный диапазон $T_{\text{мин}}/T_{\text{макс}}$	-40...+85 °С ( -50 °С при проведении дополнительных тестов )
Тестовое напряжение терминал/терминал, $V_{TT}$	$1,5 \times V_R$ , 10s, RT
Тестовое напряжение терминал/корпус, $V_{TC}$	$2 V_i + 1000 V_{AC}$ (min 2500 В перем. тока)
Уровень отказов, $\alpha_{FQ}$	300/10 <sup>9</sup> ч
Ожидаемый срок службы, $t_{LD} (C_{VI})$	100 000 ч
Класс влагозащиты	Hrel = C > relative humidity $\leq 95\%$
Время саморазряда, $\tau_{pp}$	$R_{is} > C > 10 000$ с
Стандарты	IEC1071, IEC 68, NFF-16-01/102

Если дизайн конденсатора принят к рассмотрению на ранней стадии разработки преобразователя, то конденсатор, изготовленный с учетом особенностей конструкции изделия, может иметь, например, специальный дизайн выводов (табл. 3; рис. 2, 3–5).

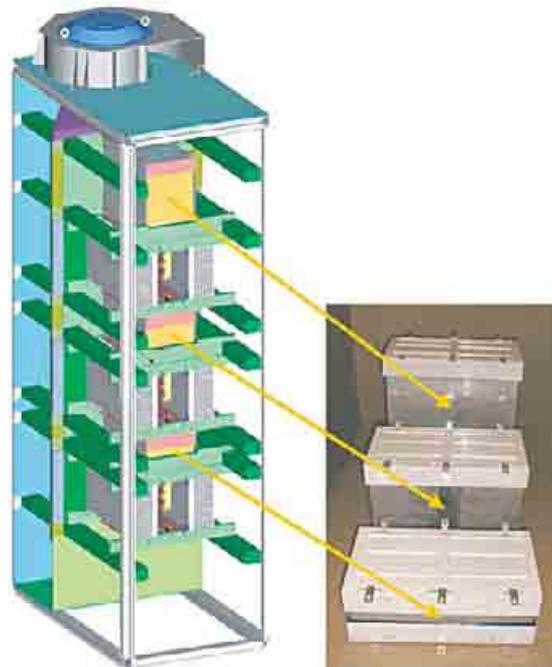


Рис. 5. Многоуровневый привод ALSTOM Symphony: низкоиндуктивное исполнение внутри ячейки. Аксиальные конденсаторы звена постоянного тока [7]

Таблица 3

Терминалы	Ток, А	Тип контакта
Плоский вывод	125	Плоская шина
Винтовой M10	160	Плоская шина
Пружинный контакт	120	Нож + плоская шина
Интегрированная плоская шина	До 400	IGBT + плоская шина

В стандартном конденсаторе PCC-HP используется компактная плоская намотка МКК-DC. Erco обладает всеми наиболее важными и передовыми технологиями намотки: круглая, плоская и так называемая стэк-намотка для производства силовых конденсаторов. Благодаря этому оптимальная система может быть заложена с самого начала разработки (рис. 6). Стэк-намотка фиксируется на платформе, усиленной стекловолокном для обеспечения высокой вибростойкости. Корпус из нержавеющей стали дополнительно упрочняет конструкцию. Платформа допускает радиальный и аксиальный дизайн и может быть снабжена различными типами выводов. Корпус конденсатора снабжен винтовыми фиксирующими гнездами M6 и может быть дополнен различными скобами для механического крепления. Такой дизайн отвечает требованиям стандарта IEC1071/68.

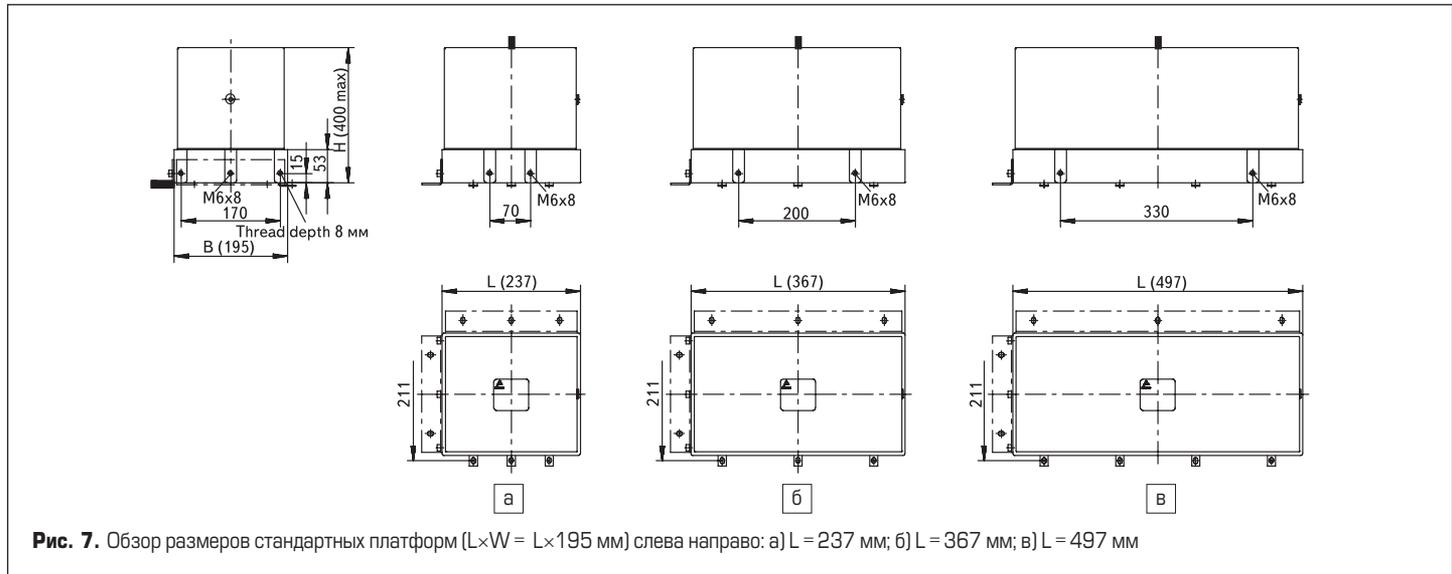


Рис. 7. Обзор размеров стандартных платформ (L×W = L×195 мм) слева направо: а) L = 237 мм; б) L = 367 мм; в) L = 497 мм

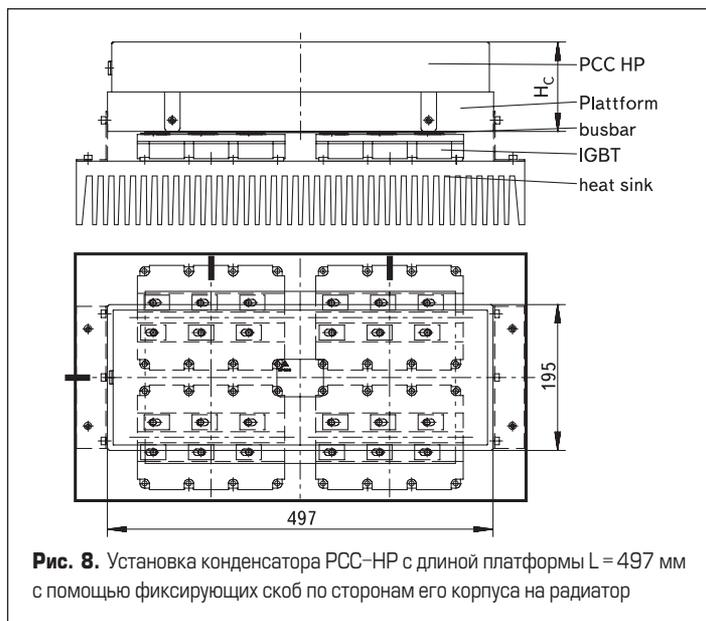


Рис. 8. Установка конденсатора PCC-HP с длиной платформы L = 497 мм с помощью фиксирующих скоб по сторонам его корпуса на радиатор

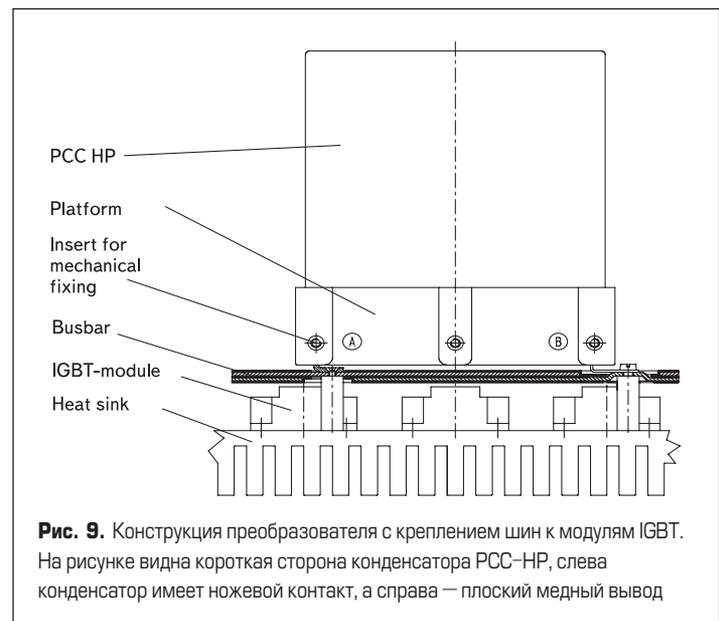


Рис. 9. Конструкция преобразователя с креплением шин к модулям IGBT. На рисунке видна короткая сторона конденсатора PCC-HP, слева конденсатор имеет ножевой контакт, а справа — плоский медный вывод

Таблица 4

Страна	Германия	Франция, Испания, Италия, США	Великобритания
Стандарт	DIN 5510	NFF16-101/102	BS473

При изготовлении оборудования требования «Стандартов пожаробезопасности для компонентов, используемых на транспорте» (Fire Standards for Public Transportation Parts) играют все большую роль, особенно после нескольких аварий, произошедших у конечных пользователей при эксплуатации данного оборудования. При выборе компонентов повышенное внимание должно быть уделено соблюдению этих стандартов, особенно NFF-16-101/102. Конденсаторы, производимые компанией Ersos по вышеперечисленным технологиям, отвечают требованиям международных стандартов (табл. 4).

### Аспекты современного дизайна

Следующий пример показывает возможные варианты изготовления. В настоящий момент изготовление стандартного конденсатора PCC-HP доступно на трех различных платформах (посадочные места) (рис. 7).

Таблица 5

Высота H, мм	80	145	256
Напряжение $V_R$ , В	Емкость $C_R$ , мкФ		
900	1400	3500	7000
1050	1150	2900	5800
1200	1000	2500	5000
1500	640	1600	3200
1800	440	1100	2200
2000	360	900	1800
3000	150	390	780

Конденсаторы PCC-HP ранжированы по напряжению  $V_R$ . Основные технические данные конденсаторов приведены в таблице 5 (для конденсатора PCC-HP стандартного размера —  $L \times W \times H = 367 \times 195 \times H$  мм).

Номинальная емкость  $C_R$  в таблице 5 показывает возможную емкость в зависимости от длины применяемой платформы и выражается следующими формулами:

$$C_{R L=237} = C_{R T5} \times 0,6; \quad (1)$$

$$C_{R L=367} = C_{R T5} \times 1,0; \quad (2)$$

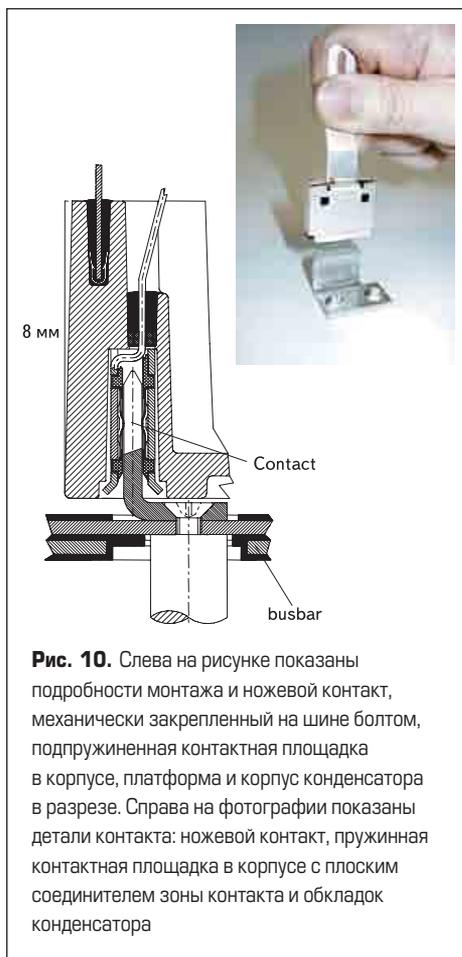
$$C_{R L=497} = C_{R T5} \times 1,4. \quad (3)$$

Монтаж конденсаторов PCC непосредственно на шины обеспечивает исключительно низкую индуктивность (рис. 8, 9, 10).

### Преимущества новых конденсаторов

Конденсаторы PCC-HP оптимизированы для использования в преобразователях для тяжелых условий транспортного и промышленного применения. Наиболее важные преимущества PCC-HP перед стандартными конденсаторами приведены ниже:

- Низкая собственная индуктивность конденсатора позволяет снизить индуктивность контура в целом.
- Непосредственный монтаж на шины и адаптация к IGBT.
- В ряде случаев позволяет отказаться от снабберных конденсаторов.
- Упрощение и снижение стоимости конечного устройства.
- Произвольное положение монтажа.
- Уменьшение объема установки в целом.
- Снижение веса установки.
- Пожаробезопасность (благодаря сухой технологии изготовления конденсаторов МКК).



- Высокая токовая нагрузка.
- Исключительная способность выдерживать мощные импульсы тока.
- Длительный срок службы.

### Тенденции

Развитие силовой электроники идет по пути увеличения мощности, компактности и степени интеграции систем. Новые силовые чип-конденсаторы, разработанные компанией Epcos для особо мощных преобразователей IGBT, удовлетворяют всем этим требованиям. Продолжающееся развитие силовых чип-конденсаторов открывает новые области их применения. Развитие силовых конденсаторов будет идти по пути совершенствования процесса металлизации для производства высококачественной самовосстанавливающейся полимерной пленки. Компания Epcos работает над увеличением токовой нагрузки и диэлектрической прочности металлизированной пленки в типичных условиях эксплуатации. Стандартные металлопленочные конденсаторы будут заменяться другими, оптимизированными под специальные применения при сохранении стоимости. Прогресс в дизайне и производстве, направленный на улучшение качества изготовления МКК-конденсаторов, позволит отказаться от конденсаторов, выполненных по старым технологиям.

В силовых приложениях свойства алюминиевых электролитических конденсаторов значительно отличаются от свойств самовосста-

навливающихся пленочных конденсаторов. В настоящее время видна тенденция к переходу на ПСС конденсаторы, особенно в тех применениях, где необходимы свойство самовосстановления при воздействии высоковольтных импульсов и стабильная емкость на протяжении всего срока службы оборудования. Конденсаторы ПСС-НР не содержат масло и могут быть легко переработаны по окончании срока службы, так как состоят из легко разделяемых материалов: полиэстер или полипропилен, медь, полиэстер, усиленный стекловолокном, и инертный газ.

### Литература

1. Vetter H. Dry MKK-Capacitors for modern rail traction. SIEMENS Components 02/96, 3/97.
2. Bramoulie, M.: Electrolytic or film capacitor. IEEE 10/98.
3. Vetter H. High power capacitors for low inductance circuits. SIEMENS Components 28/90.
4. Schütze T. Design aspects for inverters with IGBT high-power modules. Proc. PCIM Hong Kong 10/97.
5. Vetter H. Patent file US 6,409,545 B1 Jun. 25, 2002.
6. Zorzynski, D. et. al. High voltage IGBT modules in the design of a 3 kV Chopper. Proc. M.E.T. Gdansk, Poland 05/01.
7. Beinhold G., Jakob R., Nahrstead M. A new range of medium voltage multilevel inverter drives with floating capacitor technology. EPE 2001 Graz.