

# НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИЛОВЫМ КОНДЕНСАТОРАМ ДЛЯ ШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДЖ. КОНРАД (J. KONRAD), М. КОИНИ (M. KOINI), М. ШОССМАН (M. SCHOSSMANN), М. ПАФФ (M. PUFF), EPCOS OHG

*В соответствии с современными тенденциями в силовой электронике автомобильным и промышленным системам необходимы надежные и недорогие компоненты, позволяющие реализовать главные цели – увеличить плотность энергии и уменьшить размеры. В настоящее время широкое распространение получили ключевые технологии, способствующие повышению рабочей частоты коммутации силовых каскадов.*

Поскольку электронные компоненты и их характеристики усложняются, требуются решения на уровне системы. Кроме того, следует хорошо понимать, как взаимодействуют между собой активные и пассивные устройства. Конденсаторы для шины постоянного тока (DC-link) как часть контура коммутации оказывают существенное воздействие на характеристики и эффективность приложений. В разных системах силовой электроники применяются полупроводниковые сборки с небольшой индуктивностью и конденсаторы в цепи шины постоянного тока, чтобы уменьшить скачки напряжения при отключении устройств [4]. В большинстве случаев разработчикам приходится иметь дело с конденсаторами большой емкости и с большими коммутационными контурами. Конденсаторная технология CeraLink, описанная в этой статье, а ранее – в [1–2], обеспечивает высокую плотность емкости и очень малую собственную индуктивность, что минимизирует индуктивность коммутационного контура.

## КОНДЕНСАТОРЫ DC-LINK ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Конденсаторы DC-link, использующиеся в большинстве силовых преобразователей для стабилизации постоянного напряжения шины, выравнивают разность между входным источником и выходной нагрузкой. Пульсацию напряжения необходимо минимизировать во избежание воздействия импульсных напряжений и токов повышенной амплитуды на полупроводники, а также для соблюдения требований по электромагнитной совместимости. Кроме того, эти конденсаторы работают в качестве накопителей энергии в течение време-

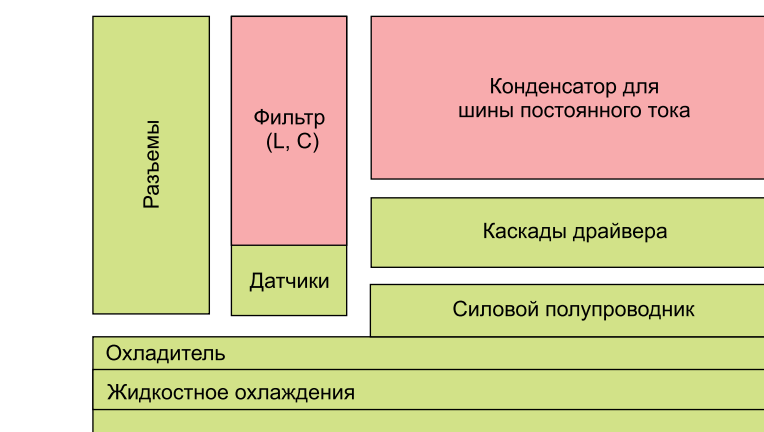


Рис. 1. Структурная схема и сравнительные размеры компонентов в инверторе двигателя [3]

ни удержания. Помимо своей основной функции конденсаторы для шины постоянного питания обеспечивают быстрое и эффективное переключение полупроводника, минимизируя используемое пространство.

Поскольку во многом размеры корпуса и габариты инвертора определяются размерами конденсаторов для шины постоянного тока [3] (см. рис. 1), высокая плотность емкости является основным параметром при уменьшении габаритов инвертора и увеличении плотности энергии. Благодаря высокой допустимой нагрузке по току, малой собственной индуктивности и оптимизированному методу соединения компактные конденсаторы для шины постоянного тока являются востребованными компонентами. То же требование распространяется и на другие силовые преобразователи, где используются миниатюрные конденсаторы. Кроме того, эти компоненты должны обладать высокой механической прочностью, чтобы противостоять механическим и климатическим воздействиям

(тепловому, электрическому, механическому и со стороны окружающей среды, соответственно). Таким образом, при совершенствовании конденсаторной технологии DC-link необходимо учитывать требования силовой электроники следующего поколения.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ: КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В конденсаторах, созданных по новой технологии CeraLink [1–2], в качестве диэлектрика применяются керамические пластины с пленкой из цирконата-титаната свинца, легированного лантаном (lead-lanthanum-zirconate-titanate, PLZT). Поскольку химический состав этих пластин имеет антисегнетоэлектрическое состояние, их емкость растет с увеличением напряжения и достигает максимального значения равного напряжению шины постоянного тока. Это состояние позволяет нивелировать эффект уменьшения емкости, свойственного сегнетоэлектрическим керамическим материалам класса 2, которые приме-

няются в многослойных керамических конденсаторах, и, следовательно, увеличить плотность емкости на уровне рабочего напряжения.

Более того, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) уменьшается с ростом частоты и температуры, обеспечивая эффективное функционирование при температурах до 150°C и высокую частоту коммутации до нескольких мегагерц.

### МАТЕРИАЛ ЭЛЕКТРОДОВ

Материал и конструкция внутренних электродов оказывает большое влияние на характеристики конденсатора, поскольку электро- и теплопроводность непосредственно связаны со свойствами материала и внутренней конструкцией конденсатора. Таким образом, в качестве материала для внутреннего электрода была выбрана медь, которая, как известно, обладает превосходными характеристиками.

Поскольку новые устройства в сфере силовой электроники становятся более компактными и эффективными, их рабочая частота, ток и температура увеличиваются. Чтобы избежать появления дополнительного источника саморазогрева конденсатора и его соединений, используемые материалы должны обеспечить минимальное удельное электрическое сопротивление в предпочтительно широком диапазоне температур и частот.

### ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Температура конденсатора в работающем устройстве – важный параметр, определяющий срок службы и максимально допустимый ток. Поскольку температура устройства зависит от ESR и тока пульсаций, генерируемое тепло можно отводить от конденсатора как можно эффективнее.

В установившемся режиме температура конденсатора является постоян-

ной величиной, а тепло, генерируемое в результате резистивных потерь ( $P_{loss}$ ), равно теплу, которое отводится от конденсатора ( $P_{th}$ ).

$$P_{loss} = P_{th} \quad (1)$$

Значение  $P_{loss}$  рассчитывается из произведения суммы ESR и квадрата тока пульсаций  $I_{C_{rms}}$ , протекающего через конденсатор. Тепло определяется правым членом выражения (2), где  $\lambda_{th}$  – тепловое сопротивление модуля;  $\Delta T$  – разность температур;  $V$  – объем устройства, а  $l$  – длина теплового тракта:

$$I_{C_{rms}}^2 \cdot ESR = \frac{\lambda_{th} \cdot \Delta T}{l^2} \cdot V \quad (2)$$

Переписав выражение (2) для тока пульсаций  $I_{C_{rms}}$  в явной форме (3), становится очевидным, что допустимая токовая нагрузка в амперах обратно пропорциональна длине тракта с отводимым теплом:

$$I_{C_{rms}} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\lambda_{th} \cdot \Delta T \cdot V}{ESR}} \quad (3)$$

Высокая токовая нагрузка обеспечивается не только размерами конденсатора, что, главным образом, зависит от используемой технологии, но и большей теплопроводностью, малым ESR и высокими допустимыми температурами.

В зависимости от требуемой теплопроводности технология CeraLink в той или иной мере обеспечивает упомянутые выше характеристики:

- компактную конструкцию с низким профилем и короткими электрическими и тепловыми трактами ( $l$ );
- высокую теплопроводность ( $\lambda_{th}$ );
- высокую допустимую разность температур  $\Delta T$ ;
- малое ESR.

### НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК

Благодаря малым тепловым потерям и высокой теплопроводности, которую обеспечивает новая технология, достигаются высокие значения номинального тока.

Как видно из рисунка 2, дальнейшее увеличение допустимого тока примерно на 25% реализуется на частоте 100 кГц с помощью принудительного охлаждения. Даже в отсутствие теплоотвода и принудительного воздушного охлаждения конденсатора обеспечиваются высокие значения номинального тока. Современные печатные платы для устройств силовой электроники имеют достаточную теплопроводность, позволяющую конденсатору работать при больших токах пульсаций.

Благодаря своей конструкции большие сборки керамических кристаллов CeraLink (>1 мкФ) также обеспечивают высокую теплопроводность всего модуля. Следовательно, допускаются номинальные токи выше 1 А/мкФ в больших конфигурациях, в которых применение других технологий страдает от недостаточной теплопроводности из-за размеров, длины тепловых трактов, а также от выбора материалов.

### ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ

Сравнение разных конденсаторных технологий выявляет следующие технические преимущества, которыми обладают миниатюрные конденсаторы для шин постоянного тока (см. рис. 3):

- у алюминиевых электролитических конденсаторов – очень высокая плотность емкости, благодаря чему они обеспечивают экономичное решение в приложениях, где не требуются высокие номинальные токи;
- пленочные конденсаторы обеспечивают приемлемые значения номинального тока, но имеют малую плотность емкости. У пленочных и алюминиевых конденсаторов – равные отношения допустимого тока пульсаций к объему;
- керамические конденсаторы – единственная технология, которая обеспечивает и высокую плотность емкости, и высокий номинальный ток;
- конденсаторы CeraLink превосходят другие стандартные керамические конденсаторы по такому показателю как плотность емкости и отношение допустимого тока к объему компонента. Большие сборки, насчитывающие до 100 керамических кристаллов, обеспечивают требуемую высокую емкость.

Конденсаторы CeraLink применяются без принудительного охлаждения при больших номинальных токах, тогда как в случае конденсаторов других типов для теплового расчета необходимо использовать данные из технических описаний.

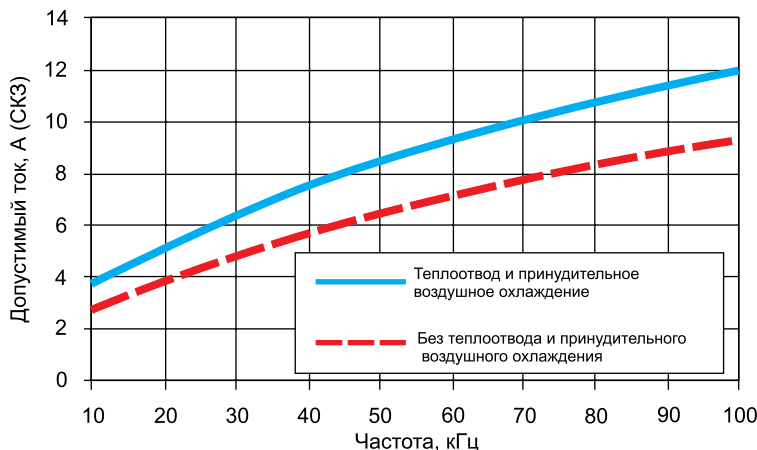


Рис. 2. Типовые значения допустимого тока в зависимости от условий охлаждения (температура окружающей среды – 85°C, емкость – 1 мкФ, 500 В); допустимый ток протекает при температуре устройства 125°C

### ПРОЧНОСТЬ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Еще одним различием между конденсаторными технологиями является тепловая устойчивость. Как правило, ток утечки диэлектрических материалов растет с температурой. Для сравнения нескольких конденсаторных технологий (см. рис. 4) была выбрана постоянная времени  $\tau(T)$  в соответствии с уравнением (4), которая описывает время саморазряда конденсатора:

$$\tau(T) = R_{ins}(T) \cdot C(T) \quad (4)$$

Она рассчитывается как произведение сопротивления изоляции при заданных значениях температуры  $R_{ins}(T)$  и емкости. Поскольку  $\tau(T)$  зависит от материала, то при сравнении конденсаторов разных емкостей и размеров, выполненных по одинаковой технологии, эту постоянную можно не учитывать – она корректируется в зависимости от размеров и величины номинального напряжения конденсатора.

Малое значение времени этой константы соответствует высокому току утечки, т.к. он пропорционален сопротивлению изоляции. В этом случае нельзя пренебречь дополнительным повышением температуры из-за тока утечки и риском возникновения отказов из-за ухода параметров или лавинного пробоя. Постоянная времени конденсаторов CeraLink остается сравнительно большой в широком диапазоне температур, что повышает запас прочности компонентов при резких скачках температуры. В отличие от других технологий, применение CeraLink может лишь сократить срок службы конденсаторов, но во множестве случаев позволит избежать ухода параметров.

В наиболее широко используемой и хорошо описанной модели для расчета срока службы конденсаторов применяется электрическое и тепловое напряжения конденсаторов [5]. Срок службы в установившемся режиме определяется при испытаниях с использованием повышенных уровней напряжения и температуры. Сравнение керамических конденсаторов с одинаковой номинальной емкостью, напряжением и температурой показывает, что многослойные керамические конденсаторы разрушаются уже через несколько десятков минут. Рассматриваемое испытание было прекращено спустя 50 тыс. мин, после того как отказали четыре из 30 образцов конденсаторов CeraLink. Из графика распределения Вейбулла (см. рис. 5) видно, что срок службы конденсаторов CeraLink гораздо больше, чем у двух разных многослойных

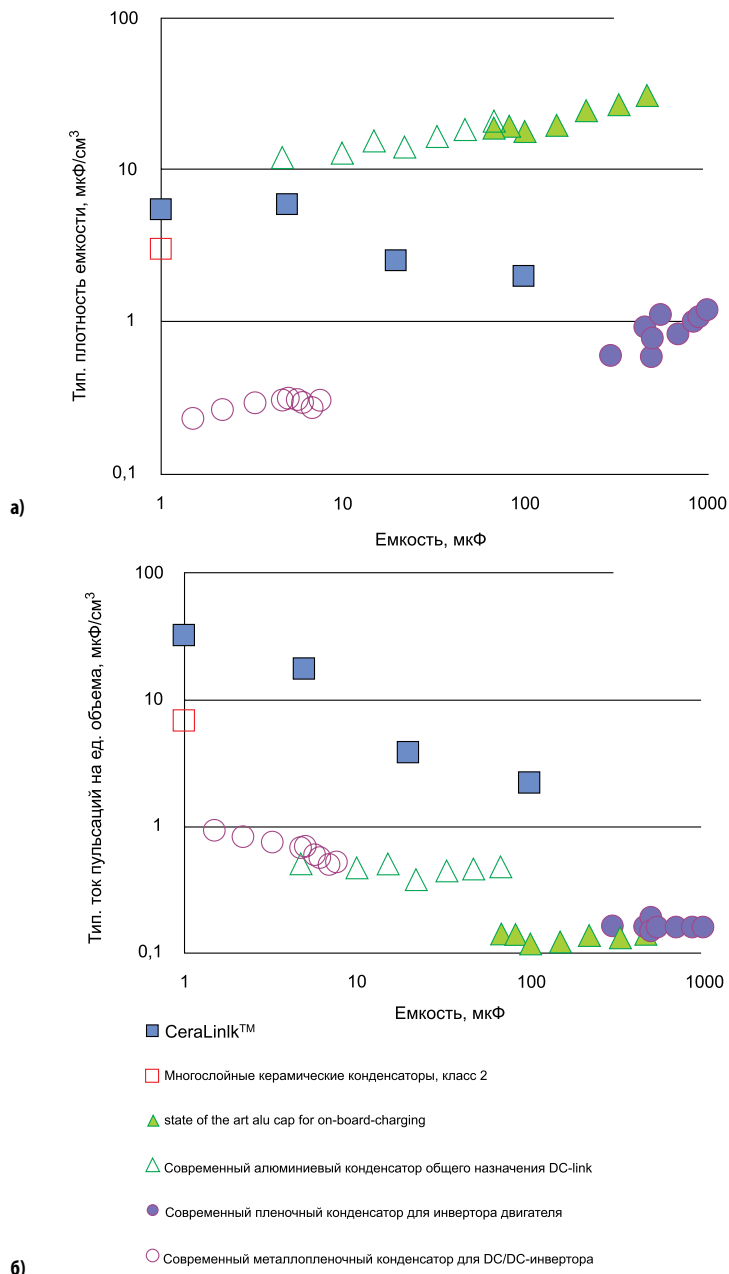


Рис. 3. Сравнение отношений а) емкости к объему; б) тока к объему конденсатора. Сравняются только конденсаторы с одинаковым номинальным напряжением

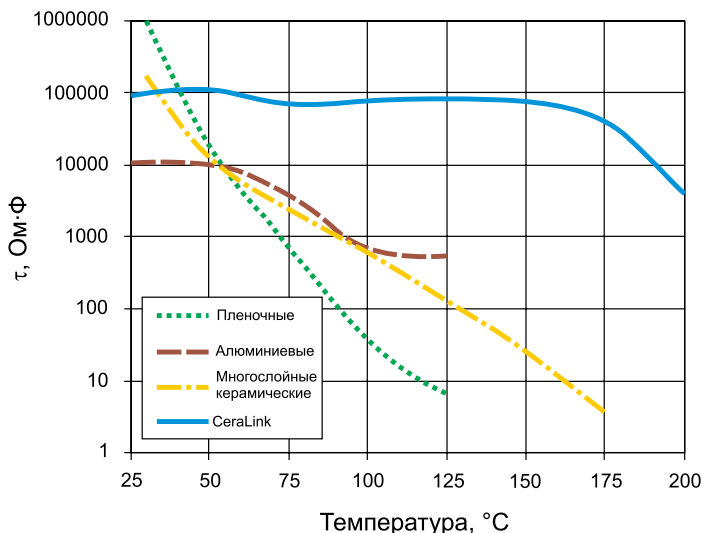


Рис. 4. Зависимость изоляционных свойств конденсаторов от температуры; сравниваются компоненты с одинаковым номинальным напряжением

## Тест HALT, 600 В DC, 200°C

Вейбулл – 95%-К1

Оценка по показателю 50 тыс. мин

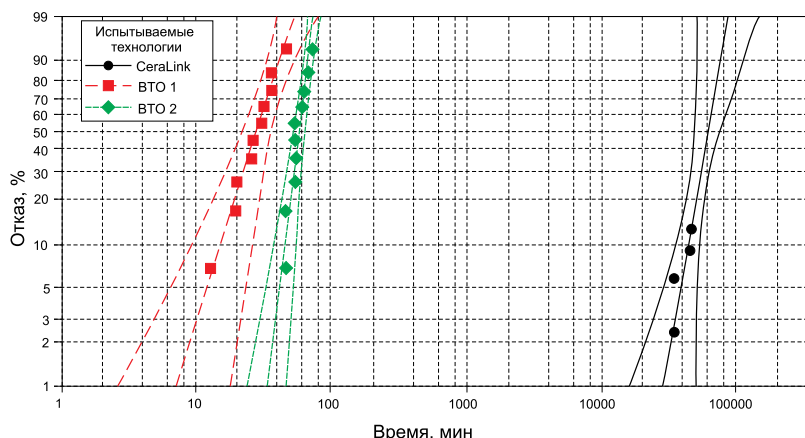


Рис. 5. Срок службы конденсаторов при высокой температуре

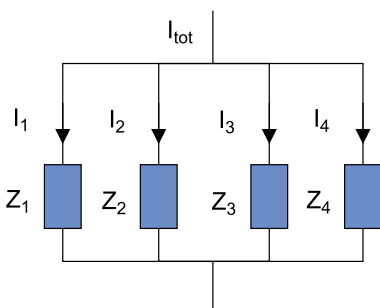


Рис. 6. Расчет срока службы при высоких температурах

керамических конденсаторов класса 2 с диэлектриком из оксида титаната бария (BTO 1 и 2).

При параллельном соединении конденсаторов необходимо учитывать температурную зависимость емкости. Поскольку импеданс  $Z_n$  обратно пропорционален току  $I_n$  через конденсатор, параллельное соединение описывается следующим образом:

$$I_n = I_{tot} \frac{Z}{Z_n} \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z} = \sum_n \frac{1}{Z_n} \quad (6)$$

Из рисунка 6 видно, что суммарный ток  $I_{tot}$  разделяется между конденсаторами. В случае если емкость конденсатора зависит от температуры, необходимо учитывать уменьшение емкости с ростом температуры. Если же эта зависимость отсутствует, емкость конденсатора повысится до максимального значения при самой высокой температуре, а импеданс  $Z_n$  станет минимальным, что приведет к протеканию максимального тока  $I_n$  и риску ухода параметров. На рисунке 7 представлена емкостная характеристика конденсаторов CeraLink при большом и малом сигналах [1–2]. Емкость при малом сигнале измеряется при напряжении 0,5 В (СКЗ)

малыми пульсациями, а емкость при большом сигнале пульсаций измеряется с использованием больших сигналов пульсаций величиной 20 В (СКЗ). Емкость увеличивается с ростом напряжения пульсаций, но этот эффект нивелируется с ростом температуры. Большие значения емкости требуются при низких температурах, особенно в тех приложениях, где проводятся испытания на запуск холодного двигателя.

При высоких температурах требуется отрицательная характеристика емкости, чтобы минимизировать риск ухода пара-

метров для материала CeraLink, даже если превышена номинальная температура 125°C. Поскольку в конденсаторной матрице через самый разогретый конденсатор протекает минимальный ток, появляется возможность создать саморегулирующуюся систему, обеспечивающую высокую устойчивость устройств CeraLink к перепадам температур и сопутствующим проблемам.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ

Сборки создаются с помощью устойчивых к высоким температурам металлокерамических межсоединений на основе спекшегося серебра. Основной частью этих сборок является керамический кристалл, на базе которого изготавливаются модули. Например, на рынке предлагаются конденсаторы емкостью 20 мкФ с паяными и запрессованными выводами. Эти устройства позволяют использовать две конфигурации выводов на 20 мкФ, 500 В и 5 мкФ, 1000 В.

Поскольку номенклатура изделий CeraLink (см. таблицу) оптимизирована под большие значения емкости для напряжений шины постоянного тока 350–450 В, эти конденсаторы предназначены для использования с полупроводниками с номинальным напряжением 600–650 В [1–2]. В соответствии с совре-

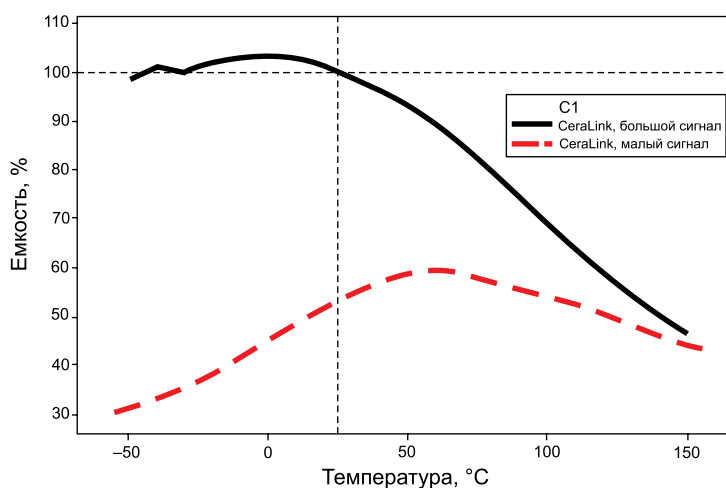


Рис. 7. Зависимость емкости от температуры ( $V_{DC} = 400 В$ )

Таблица. Номенклатура конденсаторов CeraLink

Емкость (ном.), мкФ	1	0,5	5	20/5	100
Напряжение (ном.), $V_{DC}$	500	700	500	500/1000	500
Собственная индуктивность, нГн	2,5	2,5	3,5	3/6	6,6
Длина × ширина × высота	10,84×7,85×4,25	10,84×7,85×4,25	13,25×14,24×9,35	33×22×11,5	85×65,7×9,5

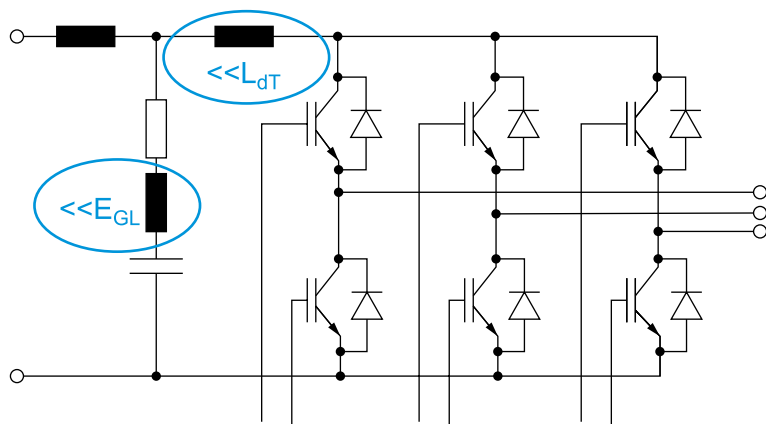


Рис. 8. Индуктивность коммутационного контура с идеальными полупроводниками в трехфазной конфигурации

менной тенденцией к росту напряжений шины в дальнейшем предполагается пополнить эту линейку конденсаторами следующих классов напряжения.

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Одной из наиболее острых проблем при использовании керамических конденсаторов является стойкость к механическому и термомеханическому напряжению и его уменьшение при транспортировке, монтаже и функционировании. Как правило, отказы керамических SMD-конденсаторов возникают в результате растрескивания керамического материала из-за теплового удара при пайке или механической перегрузке из-за деформации печатной платы. Чтобы предотвратить эти нежелательные явления, конденсаторы CeraLink оснащаются выводными рамками, которые уменьшают воздействие на керамический материал, связанное с механическим или тепловым напряжением.

Внешние выводы многослойных керамических конденсаторов классического типа часто выполняются в виде металлических насадок, которые обеспечивают паяемое соединение. Недостатком такого способа защиты от воздействия высокой температурной нагрузки при пайке является возможность появления трещин в керамике, которые распространяются от насадки и проходят через область изоляции в активную зону керамического материала. По этой причине в конденсаторах CeraLink насадка не применяется, а внешний электрод соединяется с двумя противоположными поверхностями на керамическом кристалле.

В компонентах CeraLink реализована еще одна функция защиты: внутренний электрод расположен так, чтобы образовалась последовательное соединение диэлектрических слоев (подобно соединению слоев в многослойном керамическом конденсаторе),

что обеспечивает дополнительную устойчивость к любым отказам в активной зоне. В отличие от хорошо известной встречно-штыревой конструкции электродов с противоположной полярностью, в данном случае создается еще одна группа т.н. «плавающих» электродов в средней части устройства. Преимущество такого расположения в том, что даже если два электрода соприкоснутся, вторая часть последовательного соединения по-прежнему будет работать как конденсатор, не пропуская тока.

Необходимо учитывать и внутреннюю конструкцию керамических слоев, чтобы внутреннее расширение ее элементов, вызванное электрострикционной и пьезоэлектрической силами в активной зоне, полностью компенсировалось, и даже в самых сильных полях не возникало механических повреждений в керамике. Напряжение пробоя устройств CeraLink более чем в два раза превышает их номинальное напряжение, что дает большой запас прочности системе при ее эксплуатации.

### ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Во избежание бросков напряжения при быстрой коммутации полупроводниковых устройств необходимо обеспечить высокое соотношение между емкостью конденсатора для шины постоянного тока и индуктивностью коммутационного контура. Другими словами, требуется малая собственная индуктивность конденсатора ( $ESL$ ) и малая паразитная индуктивность соединения ( $L_s$ ) в сочетании с высокой емкостью (см. рис. 8). Более того, устойчивость к высоким температурам позволяет устанавливать конденсаторы CeraLink очень близко к полупроводникам. Таким образом, создается соединение между конденсатором и полупроводником с минимальной длиной, а значит, и с малой

паразитной индуктивностью [4]. Интеграция конденсатора CeraLink в полупроводниковый модуль приносит самые большие преимущества.

Первые испытания со встроенными полупроводниками и конденсатором, установленным непосредственно в переходе коллектор-эмиттер биполярных транзисторов, показали, что броски напряжения минимальны.

### БАНК ГИБРИДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

При минимизации напряжения пульсаций на шине постоянного тока некоторое количество энергии необходимо запасать в конденсаторе. В ряде приложений емкость конденсатора требуется увеличить в связи с уменьшением частоты коммутации. При больших мощностях частоту коммутации силовых полупроводниковых компонентов невозможно увеличить, т.к. это может привести к уменьшению эффективности и эксплуатационной надежности. Однако ситуация меняется, если используются полупроводниковые ключи с широкой запрещенной зоной и топологии преобразователей с децентрализованными конденсаторами для шины постоянного тока. Применение керамических конденсаторов в этих случаях обходится дешевле при большей мощности приложений.

В настоящее время разработчики преобразователей все чаще создают банки из гибридных конденсаторов, что позволяет использовать преимущества разных конденсаторных технологий. Например, в 3,6-кВ AC/DC-преобразователе с корректором коэффициента мощности (ККМ) (см. рис. 9) для зарядных устройств применяется конденсатор CeraLink, установленный параллельно группе из четырех алюминиевых конденсаторов. Такая комбинация конденсаторов позволяет увеличить частоту коммутации до 60 кГц, задействовав магнитные компоненты меньшего размера. Броски напряжения при переключениях минимизируются в коммутационном ВЧ-контуре с очень малой индуктивностью благодаря конденсатору CeraLink, который заглушает ВЧ-составляющую тока пульсаций. Дальнейшее исключение алюминиевых конденсаторов из схем силовых полупроводниковых каскадов уменьшит выделение тепла, позволив увеличить срок службы компонентов.

### ВЫВОДЫ

Такие задачи современной силовой электроники как повышение плотности мощности, эффективности





Рис. 9. Демонстрационный макет AC/DC-преобразователя с ККМ (конденсатор CeraLink – синего цвета, четыре алюминиевых конденсатора – черного цвета)

и надежности выдвигают новые требования к конденсаторам шин постоянного тока. Большая плотность емкости наряду с высокими номинальными токами и высокой теплоустойчивостью позволяют уменьшить габариты изделий и найти новые решения при проектировании силовой электроники. Значение коммутационных контуров с малой индуктивностью, позволяющих повысить эффективность переключения полупроводнико-

вых устройств, увеличивается с ростом использования полупроводников с широкой запрещенной зоной.

Технология CeraLink уже обеспечивает те характеристики, которые отвечают требованиям современных систем и будущих приложений. Благодаря тому, что миниатюрные силовые модули обладают исключительно высокой тепловой устойчивостью и очень хорошо защищены от помех, конденсаторы CeraLink станут ключе-

выми компонентами в будущих высокоэффективных и компактных решениях для шин постоянного тока. ◀

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G.F. Engel, M. Koini, J. Konrad, M. Schossmann. A new technology for ceramic power capacitors. PCIM. Nuremburg. Germany. 2012.
2. G.F. Engel, M. Koini, J. Konrad, M. Schossmann. New high current – high voltage ceramic power capacitors. Automotive power electronics conference. Paris. France. 2013.
3. R. Plikat, C. Mertens, I. Koch. Does further electrification bring new challenges in power electronics? Automotive power electronics conference. Paris. France. 2013.
4. K. Vogel, D. Domes. IGBT inverter with increased power density by use of a high-temperature and low-inductance design. PCIM. Nuremburg. Germany. 2012.
5. H. Wang, F. Blaaberger. Reliability of capacitors for DC-link applications – an overview. 978-1-4799-0336-8/13 IEEE. 2013.
6. EPCOS AG. Power capacitor chip for 650-VR semiconductors.