

# Свойства пленочных конденсаторов DUCATI Energia

**Многим известна итальянская фирма DUCATI, давно и успешно производящая современные мотоциклы. Однако не многие знают компанию DUCATI Energia, изготавливающую современные пленочные конденсаторы, используемые в силовой электронике. В обзоре приведены сведения о технологии производства полипропиленовых конденсаторов, их основные технические параметры, номенклатура и области применения.**

**Александр Савельев**

asaveleyev@west-l.ru

## Введение

Компания DUCATI Energia, основанная в 1926 г., первой в Италии начала производить конденсаторы для радиопередающего оборудования Гульельмо Маркони.

Превосходные характеристики и уменьшенные габариты по сравнению с уже устаревшими масло- и газонаполненными конденсаторами с бумажным диэлектриком делают эти изделия новым производственным стандартом для применения в силовой электронике. Все конденсаторы, изготовленные фирмой, имеют характерную особенность — защитное устройство, соответствующее стандарту IEC 61071-1/2. В случае возникновения неисправности и, как следствие, избыточного давления внутри конденсатора защитное устройство отключит соединение, предотвращая тем самым разрушение корпуса в результате взрыва или возгорания. Устройство обеспечивает достаточно высокую скорость срабатывания как для малых, так и для больших токов короткого замыкания (до 10 000 А).

## PPM/МКР-технология

В применяемой фирмой металлизированной полипропиленовой технологии (PPM/МКР) используется метод вакуумного напыления, чтобы осадить экстремально тонкий слой металла на одной из поверхностей полипропиленовой пленки. Элементарный конденса-

тор, изготовленный по такой технологии, получается путем закручивания в спираль двух полипропиленовых пленок, где сам же полипропилен и является диэлектриком. Основное преимущество МКР-конденсаторов — их самовосстановление после пробоя. Это означает, что они способны восстановить свои электрические свойства после короткого замыкания внутри диэлектрика. Вследствие сверхмалой толщины напыления ток короткого замыкания в локальной зоне выпаривает металлическое покрытие и, таким образом, автоматически затухает без существенной потери конденсатором своей емкости и лишнего расхода энергии.

## Стандартная серия PPM-конденсаторов

В PPM-конденсаторах серии Standart life (SL) наполнителем является специальный тип смолы. Производимая DUCATI Energia композиция из такой смолы является экологически чистой и имеет высокую диэлектрическую стабильность. Она также полностью исключает возможность попадания внутрь конденсатора молекул воды и воздуха.

## Технология PPMh/МКPh и PPMd/МКPd

Научные исследования, проводимые в лаборатории DUCATI Energia, направлены на разработку полипропиленовой пленки со специальной металлизацией, назначение которой состоит в увеличении градиента напряжения без уменьшения срока службы. В результате такой инновационной технологии существенно уменьшились размеры конденсатора при сохранении его диэлектрических свойств и характеристик, связанных с током и напряжением.

Пленка, разработанная по технологии PPMh, предназначена для работы на переменном токе, но также может работать и на постоянном токе в соответствии с техническими условиями. К этой категории относятся конденсаторы серий GP-42, GP-84 (рис. 1).

Технология PPMd подразумевает работу только на постоянном токе с высоким уровнем пульсаций. К этой категории относятся конденсаторы серий DC85, DC88, DC89, DC45 (рис. 2).



**Рис. 1.** Конденсаторы серии GP-42, GP-84



**Рис. 2.** Конденсаторы серии DC85, DC88, DC89, DC45

**Термины и определения**

**Номинальная емкость**

Емкость конденсатора, соответствующая величине номинальной емкости ( $C_n$ ) при температуре окружающей среды  $20 \pm 5$  °C и номинальном напряжении. Для конденсаторов, изготовленных из металлизированной полипропиленовой пленки, емкость и тангенс угла потерь зависят от температуры. Типичные графики этих зависимостей приведены на рис. 3 и 4.

**Допустимое отклонение емкости**

Максимальное отклонение от величины номинальной емкости измеряется при температуре окружающей среды  $20 \pm 5$  °C и номинальном напряжении.

**Номинальное напряжение переменного тока**

$U_{nAC}$  — максимальное рабочее пиковое периодическое, изменяющееся по величине и знаку, напряжение любой полярности, на которое рассчитан конденсатор.

**Номинальное напряжение постоянного тока**

$U_{nDC}$  — максимальное рабочее пиковое напряжение любой полярности, изменяющееся по величине, но не по знаку, на которое рассчитан конденсатор.

**Номинальное ( $R_{ms}$ ) напряжение  $U_{rms}$**

Среднеквадратичное значение максимально допустимого напряжения переменного тока в продолжительном режиме работы. Для синусоидального напряжения справедливо следующее соотношение:

$$U_n = U_{rms} \times \sqrt{2}$$

**Пиковое негармоническое напряжение**

$U_s$  — пиковое напряжение, вызванное переключением или любыми другими возмущениями или помехами в оборудовании, которые допускаются максимум 500 раз и продолжительностью менее чем 100 мс (рис. 5).

**Напряжение пульсаций  $U_r$**

Величина однополярного напряжения от минимального до максимального всплеска пульсаций (рис. 6).

**Максимальный ток  $I_{max}$**

Максимальное среднеквадратичное значение допустимого тока в режиме непрерывной работы. Эта величина связана с максимальной мощностью рассеивания при предельно возможной температуре корпуса ( $\theta_{max}$ ), при которой конденсатор еще может работать. Работа на максимальном токе ( $I_{max}$ ) приводит к повышению температуры корпуса конденсатора на 10–15 °C над температурой окружающей среды — в зависимости от типа конденсатора (см.  $R_{thc}$  для каждой модели) и его применения. Во избежание тепловой неустойчивости

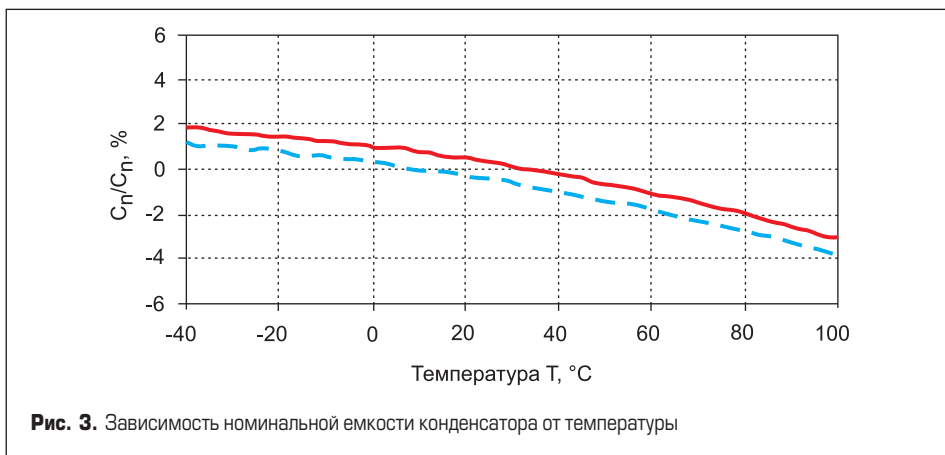


Рис. 3. Зависимость номинальной емкости конденсатора от температуры

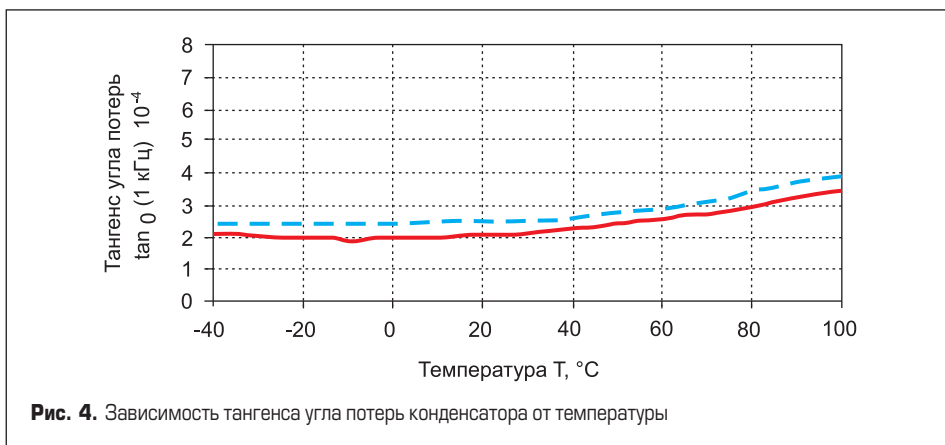


Рис. 4. Зависимость тангенса угла потерь конденсатора от температуры

температура корпуса конденсатора не должна достигать максимальной рабочей температуры ( $\theta_{max}$ ), поэтому необходимо уменьшать либо температуру окружающей среды при помощи воздушных охладителей, либо максимальный ток ( $I_{max}$ ).



Рис. 5. Возможная эпюра напряжения на конденсаторе при работе на переменном токе

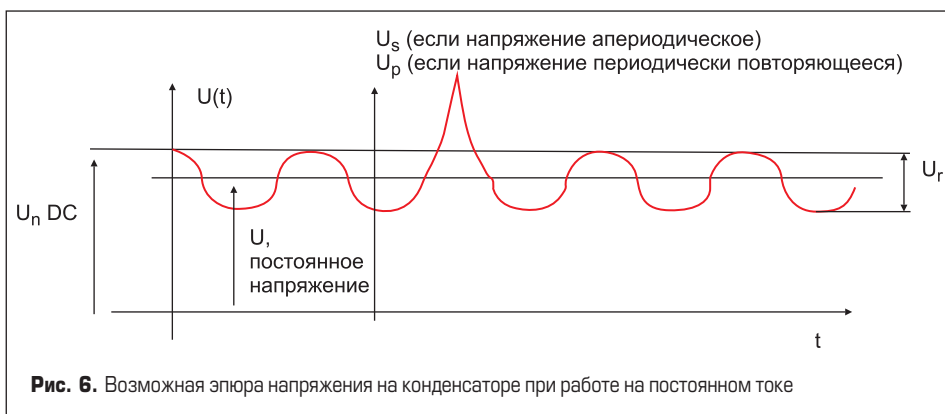


Рис. 6. Возможная эпюра напряжения на конденсаторе при работе на постоянном токе

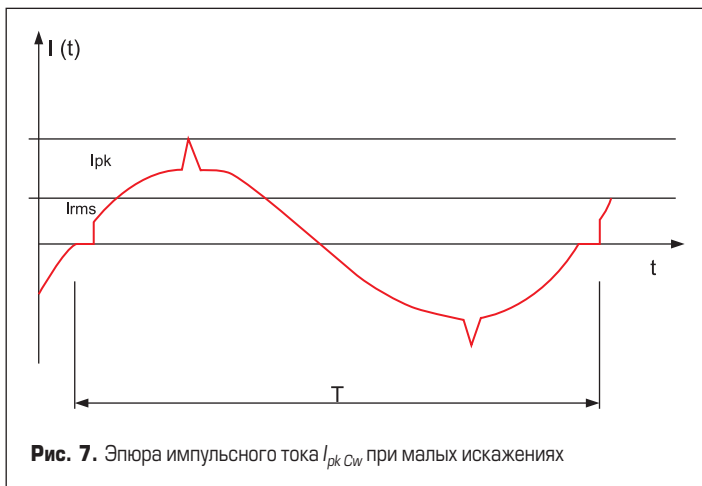


Рис. 7. Эпюра импульсного тока  $I_{pk/CW}$  при малых искажениях

**Максимальный пиковый ток  $I_{pk}$**   
 Максимальное мгновенное значение амплитуды тока в режиме непрерывной работы. Для некоторых видов конденсаторов в соответствии с типовым применением (большие или малые искажения) необходимо описывать два различных максимальных пиковых значения тока (рис. 7, 8).

**Скорость нарастания напряжения  $du/dt$**   
 Максимально допустимое значение скорости нарастания периодически изменяющегося рабочего напряжения.

**Пиковый ток перегрузки  $I_s$**   
 Допустимый пиковый ток, вызванный переключением или любыми другими возмущениями или помехами в оборудовании, которые допускаются максимум 500 раз и продолжительностью менее чем 100 мс.

**Эквивалентное последовательное сопротивление**  
 $R_{esr}$  — эффективное сопротивление, которое, если представить его последовательно соединенным с идеальным конденсатором той же самой емкости, имело бы потери мощности, равные активной мощности рассеивания в конденсаторе в указанных режимах эксплуатации. Обычно для частот ниже

резонансных справедливо следующее соотношение:

$$R_{esr} = R_s + (\tan\delta_0 / 2\pi f C).$$

**Последовательное сопротивление**  
 $R_s$  определяет тепловые потери тока ( $I_{rms}^2 \times R_s$ ) в конденсаторе.

**Эквивалентная последовательная индуктивность  $L_{esr}$**   
 Величина индуктивности, которую имеет конденсатор вследствие наличия выводов, особенно стей намотки и геометрических размеров.

**Тепловое сопротивление**  
 $R_{thc}$  — тепловое сопротивление ( $^{\circ}C/W$ ) между самой горячей точкой на корпусе конденсатора при естественной конвекции и тепловом равновесии и температурой, измеренной на расстоянии 0,1 м от корпуса конденсатора и 2/3 по высоте конденсатора от основания. Справедливо следующее соотношение:

$$P_{max} = 1/R_{thc} \times (\theta_c - \theta_{max}).$$

**Максимальный тангенс угла потерь**  
 $\tan\delta_{max}$  выражается через соотношение между эквивалентным последовательным со-

противлением и реактивной емкостью конденсатора при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц. Номинальный тангенс угла потерь ( $\tan\delta$ ) рассчитывается по формуле:

$$\tan\delta = 2\pi f C R_{esr} = \tan\delta_0 + 2\pi f C R_s.$$

**Безопасная зона**  
 Следующие графики показывают максимально допустимые напряжения и токи в режиме перегрузки. Амплитуда перенапряжения или перегрузка по току может быть допустима без значительного снижения срока службы конденсатора, если температура корпуса конденсатора не превышает максимально допустимую рабочую температуру (рис. 9, 10).

**Испытательное напряжение между выводами  $U_{tt}$**   
 Эта стандартная процедура проверки всех конденсаторов перед поставкой проводится при комнатной температуре. Конденсатор подвергается проверке испытательным напряжением в течение 10 с, прикладываемым между выводами. Во время теста не должно происходить поверхностного искрения или пробоя. Для каждой модели конденсатора в техническом описании указывается свое тестовое напряжение.

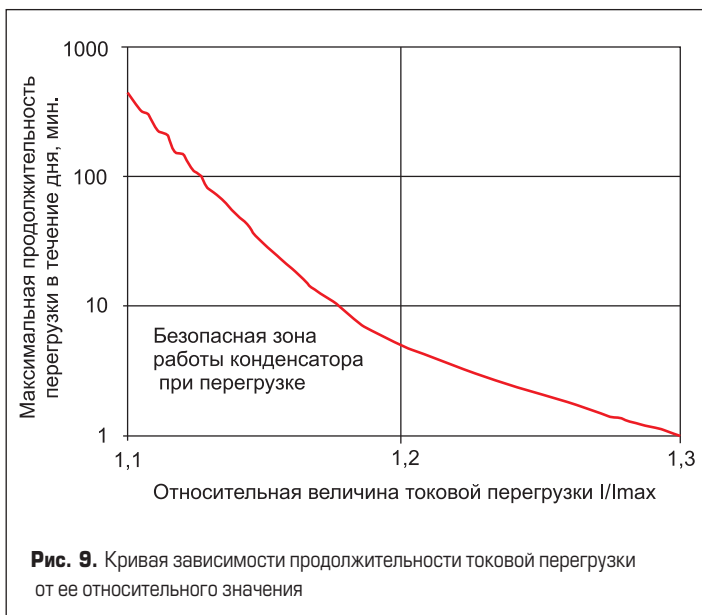


Рис. 9. Кривая зависимости продолжительности токовой перегрузки от ее относительного значения

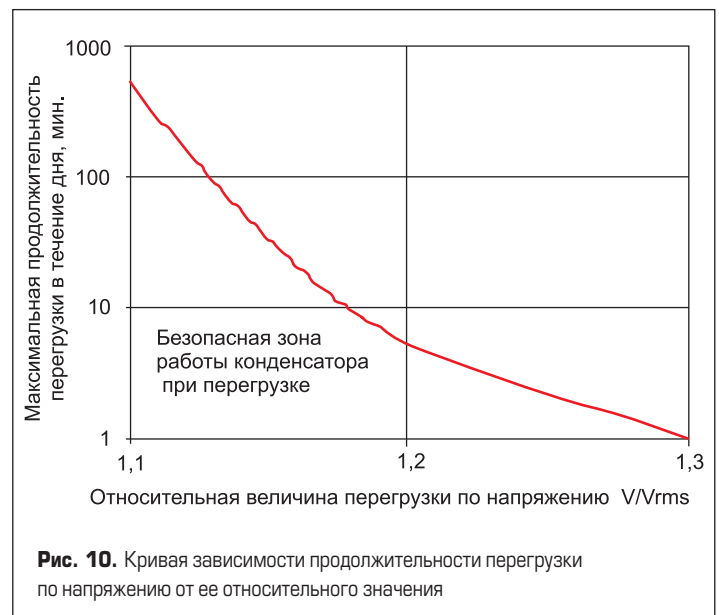


Рис. 10. Кривая зависимости продолжительности перегрузки по напряжению от ее относительного значения

**Испытательное напряжение между выводами и корпусом  $U_{tc}$**

Эта, также стандартная, проверка всех конденсаторов перед поставкой проводится при комнатной температуре. Конденсатор, у которого все выводы изолированы от корпуса, в течение 10 с подвергается испытаниям тестовым напряжением переменного тока, прикладываемым между выводами, соединенными вместе и с корпусом. Во время теста не должно происходить поверхностного искрения или пробоя. Для каждой модели конденсатора в техническом описании указывается свое тестовое напряжение.

**Минимальная рабочая температура**

$\theta_{min}$  — минимально допустимая температура корпуса конденсатора в режиме теплового равновесия, при которой он может быть использован.

**Максимальная рабочая температура**

$\theta_{max}$  — максимально допустимая температура корпуса конденсатора в режиме теплового равновесия, при которой он может быть использован.

**Климатические категории**

Конструкция конденсаторов по климатической категории относится к классу F, который характеризуется следующими параметрами:

- максимальная относительная влажность воздуха 75% (среднегодовое значение);
- максимально допустимая влажность 95% за 30 дней/год;
- конденсат недопустим.

**Надежность**

**Защита конденсатора против случайного контакта**

В соответствии со стандартом IEC 61071 все конденсаторы проходят 100%-ный контроль (тестовое напряжение прикладывается между выводами и корпусом). После этого выводы конденсаторов открытого типа должны быть соединены с болтом корпуса или со специальным заземляющим лепестком.

**Защита от перегрузки и отказа в конце срока службы**

Все описываемые конденсаторы «самовосстанавливающиеся»: в случае электрического пробоя слой напыления вокруг канала пробоя под действием температуры электрической дуги испаряется, создавая при этом небольшое избыточное давление. При этом формируется изоляционная зона с надежной электрической прочностью и высоким напряжением пробоя, обеспечивающая работу конденсатора во всех требуемых режимах. Таким образом, конденсатор остается полностью работоспособным как во время, так и после пробоя.

В результате неоднократных перегрузок или в конце срока службы увеличивающееся количество самовосстанавливающихся пробоев может привести к значительному повышению давления внутри конденсатора и разрушению его наружной оболочки. Чтобы предотвратить это, в конденсатор обязательно устанавливается так

называемое устройство сброса давления. Этот защитный механизм основан на тонком пятне контакта на одном из выводов внутри конденсатора. Когда давление увеличивается, корпус конденсатора расширяется, внутреннее пятно контакта разрывается, отключая его от внешнего вывода (рис. 11). Следует помнить, что такая система защиты работает только в пределах допустимых электрических нагрузок.

Конденсаторы в прямоугольном корпусе изготавливаются с переключателем избыточного давления, который срабатывает при повышении давления внутри корпуса. Соответствующая внешняя схема защиты, которая должна быть предусмотрена пользователем, немедленно отключает конденсатор.

**Защита от перенапряжений и короткого замыкания**

Как уже было сказано выше, конденсаторы самовосстанавливаются и регенерируют свои свойства после повреждения диэлектрика. Прочность диэлектрика проверяется при помощи максимально допустимого испытательного напряжения. Конденсаторы также проходят испытание на внешнее короткое замыкание. Токковые перегрузки обеспечиваются предельно допустимым разрядным током, который не должен превышать величин, установленных международным стандартом.

**Эксплуатационный ресурс**

Расчетный ресурс работы конденсаторов составляет 100 000 ч (допустимый процент от-

казов — 3%). При этом срок службы конденсатора зависит от температуры внутри корпуса в процессе эксплуатации и напряженности поля в его диэлектрике (рис. 12).

**Инструкция по работе и монтажу**

**Подключение**

Подключение проводов к резьбовым выводам конденсатора должно осуществляться при помощи двух гаек. Во время затяжки гаек необходимо избегать передачи любого усилия на изолятор во избежание его повреждения. Не рекомендуется паять провода к выводам конденсатора.

Рекомендуемые величины моментов затяжки гаек терминалов:

- M6 — не более 3 Н·м;
- M10 — не более 7 Н·м;
- M12 — не более 12 Н·м;
- для выводов с винтовыми зажимами M6 — 3–4 Н·м.

**Избыточное давление**

Все конденсаторы переменного тока с устройством избыточного давления должны подсоединяться при помощи достаточно гибких проводников, чтобы обеспечить функционирование этого механизма; учитывая расширение конденсатора, необходимо обеспечить определенное свободное место над его выводами. В зависимости от размеров конденсатора его корпус может расширяться в пределах 15–30 мм (рис. 13).

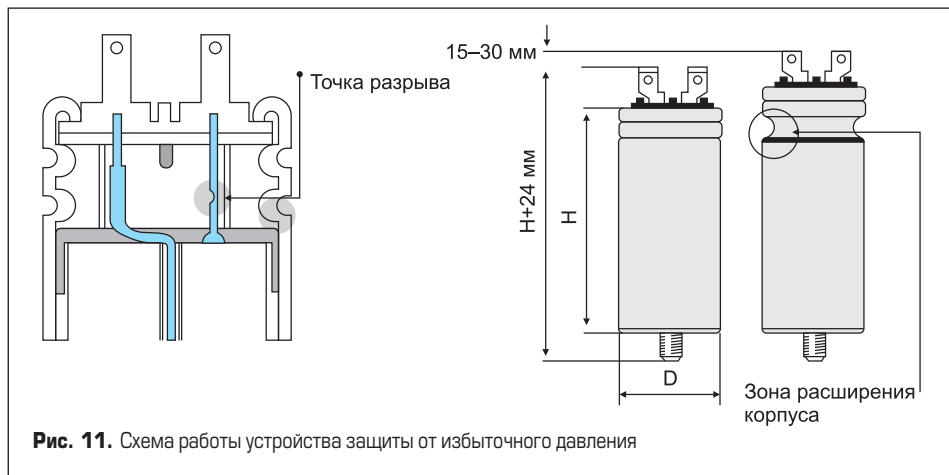


Рис. 11. Схема работы устройства защиты от избыточного давления

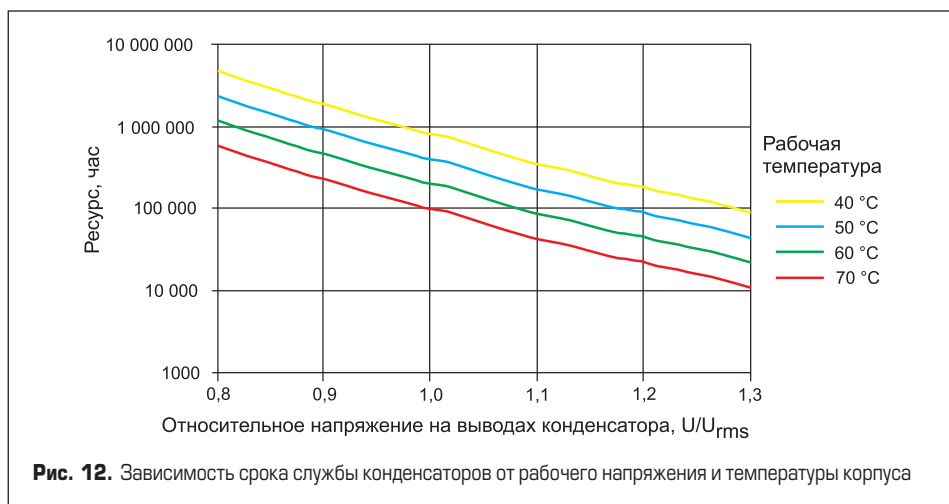
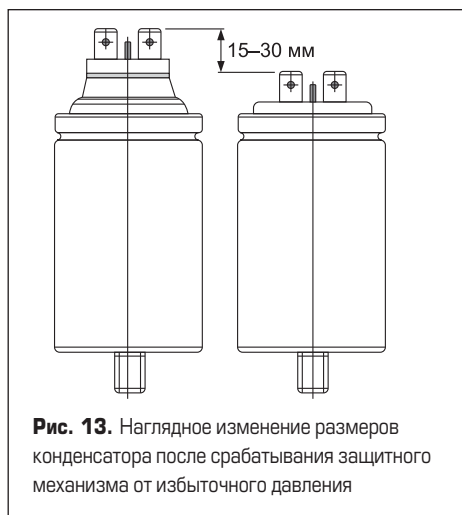


Рис. 12. Зависимость срока службы конденсаторов от рабочего напряжения и температуры корпуса



**Рис. 13.** Наглядное изменение размеров конденсатора после срабатывания защитного механизма от избыточного давления

**Размещение при монтаже**

Как уже было сказано выше, срок службы конденсатора может значительно уменьшиться под воздействием повышенной температуры. Чтобы избежать перегрева, конденсаторы должны иметь возможность беспрепятственно отдавать свои собственные тепловые потери в окружающую среду и быть экранированными от внешних источников тепла. Если обстоятельства дают повод для сомнений, то необходимо провести дополнительные испытания с целью определения максимально допустимой температуры конденсатора в самых неблагоприятных условиях. Следует отметить, что внутренний тепловой баланс конденсатора достигается в процессе работы только спустя несколько часов.

**Расположение при монтаже**

Конденсаторы с жидким или вязким наполнителем должны быть установлены

**Таблица.** Пример использования основных типов полипропиленовых конденсаторов

Тип конденсатора	Серия	Применение
Конденсаторы общего применения	GP 42-416.42 GP 84-416.84	Переключающие схемы, освещение, UPS-фильтры, PFC с высокими гармониками, резонансные цепи, DC-фильтры
Конденсаторы для работы на постоянном токе	DC 85-416.85 DC 86P-416.86 DC 89HC-416.89 DC 88M-416.88 DC 45-416.45	Фильтры и хранение энергии
Трехфазные конденсаторы для фильтров переменного тока	Modulo XD-416.46	Одно- и трехфазные фильтры, PFC для ветрогенераторов

вертикально, таким образом, чтобы выводы находились вверху. Если необходимо иначе расположить конденсатор, необходимо обратиться в отдел технической поддержки компании DUCATI Energia для консультации. Конденсаторы с диэлектриком из смолы могут монтироваться в любом положении без ограничений.

**Заземление**

Конденсаторы в металлическом корпусе должны быть заземлены через монтажный болт или при помощи крепежной скобы или хомута.

**Разряд**

Если не обеспечен разряд конденсатора при помощи внешних цепей в схеме, то его необходимо снабдить разрядным сопротивлением. В любом случае выводы конденсатора должны быть замкнуты накоротко перед тем, как до них дотрагиваться. Обратите внимание, что конденсаторы с номинальным напряжением выше 750 В в отдельных случаях могут генерировать новое напряжение на своих терминалах после замыкания их накоротко даже за короткий промежуток времени. Этот режим возникает из-за внутренней связи элементов конденсатора, поэтому хранить

их необходимо с выводами, постоянно замкнутыми накоротко.

**Утилизация**

Конденсаторы компании DUCATI Energia не содержат свинца, растворителей и других токсичных или запрещенных веществ. Материалы, входящие в состав наполнителей, состоят из растительных масел или полиуретановых композиций. Конденсаторы не входят в разряд опасных изделий и не подпадают под маркировку «Опасные грузы» при перевозке. Конденсаторы подлежат утилизации через специальные центры по обработке отходов электроники.

**Применение**

В заключение приведем пример использования основных типов полипропиленовых конденсаторов для силовой электроники компании DUCATI Energia (таблица).

**Литература**

1. [www.ducatienergia.com](http://www.ducatienergia.com)
2. DUCATI Energia. Power Electronic Capacitors. 04/2010 (9091).