

# Выбор пассивных компонентов

## для неизолированного импульсного источника питания

**В статье приведен краткий обзор пленочных конденсаторов китайской фирмы VM, выпускаемых на основе полипропиленового диэлектрика. Особое внимание уделено индуктивным компонентам Pulse Electronics для импульсных источников питания, их разновидностям, видам потерь и методике оптимального подбора необходимого компонента.**

**Андрей Ковригин**

passive@macrogroup.ru

**И**мпульсный источник питания (Switch Mode Power Supply, SMPS) способен поддерживать постоянное заданное выходное напряжение ( $V_{out}$ ) при изменяющемся входном напряжении ( $V_{in}$ ), т. е. имеет регулируемый выход. Постоянное значение  $V_{out}$  задается при помощи корректировки частоты импульсов рабочего цикла. Дроссель и конденсатор в схеме SMPS поддерживают устойчивый выходной ток. Без использования дросселя ток в таких источниках будет изменяться до нулевых значений при сменах импульсов переключения схемы управления. Конденсатор в этой цепи является фильтром пульсаций тока и элементом накопления необходимой энергии для совместной работы с дросселем.

### Конденсаторы

При выборе конденсаторов для импульсных преобразователей особое внимание уделяется показателям надежности, качеству и минимальным значениям паразитных потерь. При высоком постоянном напряжении основной причиной старения являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды. При переменном напряжении и импульсных режимах основной причиной старения становятся ионизационные процессы, возникающие внутри диэлектрика или у краев обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Напряжение электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом.

Температура и влажность воздуха также являются важными факторами, влияющими на долговечность и сохранность конденсаторов. Длительное воздействие высокой температуры вызывает ускоренное старение диэлектрика, в результате чего характеристики конденсатора ухудшаются. Тепловое воздействие на конденсатор может быть периодически изменяющимся. Наряду с внешней температурой

на пленочные конденсаторы в составе аппаратуры может дополнительно воздействовать теплота, выделяемая другими сильно нагревающимися при работе компонентами. В условиях повышенной влажности на электрические характеристики конденсаторов влияет как пленка воды, образующаяся на поверхности, так и внутреннее поглощение влаги диэлектриком. Проникновение влаги внутрь конденсатора снижает его сопротивление и электрическую прочность.

### Пленочные конденсаторы как альтернатива электролитам

Пленочные конденсаторы имеют много преимуществ перед электролитами в промышленных преобразователях мощности, в электротранспорте и производственном оборудовании, хотя они и не являются их полной альтернативой ввиду различия по размерам. Среди этих преимуществ:

- возможность выдерживать высокий среднеквадратичный ток до 1 Arms/мкФ;
- возможность держать удвоенное избыточное номинальное прямое и обратное напряжение;
- стойкость к высоким пиковым токам;
- отсутствие кислотного загрязнения при утилизации;
- продолжительное время хранения и эксплуатации (до 100 000 ч).

Основа металлизации — покрытие диэлектрической пленки очень тонкими металлическими слоями. В случае пробоя диэлектрика покрытие может улетучиваться и изолировать дефект. Это явление называется самовосстановлением? или способностью самоблокировки внутренних дефектов. Современные диэлектрические пленки VM, используемые для конденсаторов постоянного тока, покрыты очень тонким металлическим слоем. В случае любого дефекта металл испаряется и изолирует его, эффективно восстанавливая конденсатор. После пробоя номинальная емкость пленочного конденсатора немного

уменьшается (в пределах погрешности, указываемой производителем), но полного отказа и короткого замыкания нет. Эта особенность может значительно снизить текущие затраты на обслуживание и обеспечить более высокую эффективность использования SMPS.

Рассмотрим далее различные схемы неизолированных импульсных преобразователей тока.

### Повышающий преобразователь напряжения

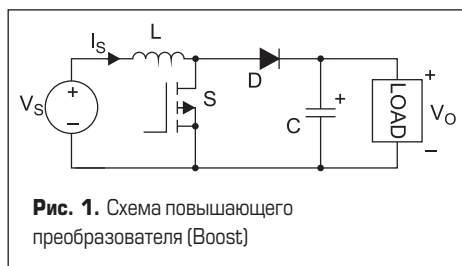


Рис. 1. Схема повышающего преобразователя (Boost)

Повышающий преобразователь (рис. 1) позволяет увеличивать напряжение (при понижении тока) от входа до выхода. Основное применение — преобразователи для электротранспорта, где напряжения одной батареи бывает недостаточно для поддержания 500 В на входе мотора. Данный преобразователь позволяет использовать меньшее количество батарей, увеличивая доступное постоянное напряжение до требуемого уровня. В качестве элемента фильтра в таком преобразователе можно применить пленочный конденсатор DC-LINK.

Конденсатор в данной цепи будет предотвращать пульсации, поступающие обратно от электродвигателя к источнику тока (аккумуляторной батарее), и сглаживать скачки напряжения шины. Для защиты полупроводников (тиристоров и IGBT-модулей) в повышающих преобразователях также могут использоваться демпферные версии пленочных конденсаторов.

Конденсаторы DC-LINK (рис. 2 и 3) имеют хорошие электрические характеристики, ма-

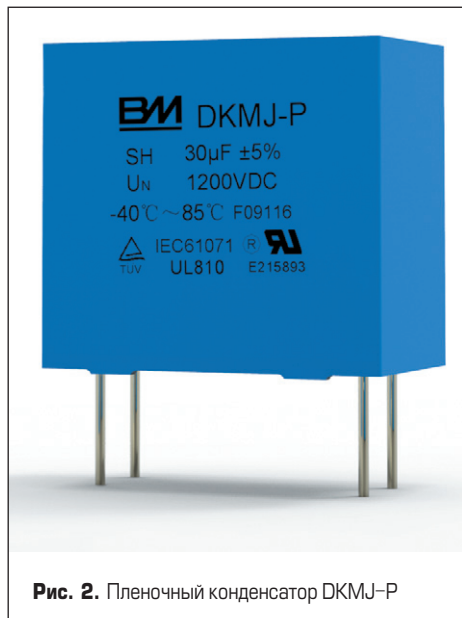


Рис. 2. Пленочный конденсатор DKMJ-P



Рис. 3. Пленочный конденсатор DKMJ-C

лые потери в диэлектрике, высокое значение сопротивления изоляции, низкую диэлектрическую абсорбцию и высокую диэлектрическую прочность (табл. 1). Они практически нечувствительны к повышенной влажности и имеют стабильность параметров при длительных сроках эксплуатации. Следует отметить также, что они имеют отрицательный температурный коэффициент (-200 ppm/°C). Минимальная требуемая емкость конденсатора вычисляется по формуле:

$$C = I_{rms} / U_r \times 2\pi \times f.$$

Согласно данному выражению, соотношение расчетной емкости пленочного конденсатора и электролитического составляет 1:25 мкФ.

Таблица 1. Технические характеристики конденсаторов DC-LINK от BM

	DKMJ-P	DKMJ-C
Рабочее напряжение, В	450–1200	500–4000
Диапазон емкости, мкФ	1–120	20–5600
Отклонения емкости, %	±5, ±10, ±20	±5, ±10
Рабочая температура, °C	+85	
Максимальная температура, °C	+105	
Срок службы, ч	100 000	
Показатель отказов	50 FIT	

### Понижающий преобразователь

Понижающий преобразователь (рис. 4) является одним из наиболее распространенных. Он используется в цепях, где выходное напряжение постоянного тока (на нагрузке) должно быть ниже входного напряжения постоянного тока. Вход постоянного тока может быть выведен от выпрямленного переменного тока или из любого источника постоянного тока. Простейший преобразователь состоит из диода, переключателя (обычно MOSFET) и одного

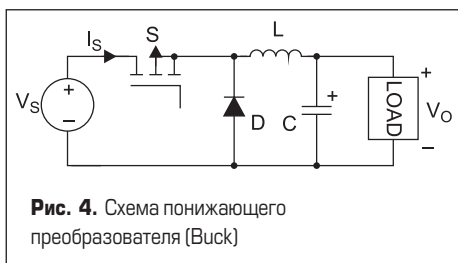


Рис. 4. Схема понижающего преобразователя (Buck)

индуктора для применения в однофазных цепях. Чтобы уменьшить пульсацию напряжения, в источник добавляется фильтр на основе конденсатора (фильтр на стороне нагрузки). В качестве фильтра нагрузки можно применить как электролитические, так и пленочные конденсаторы, в зависимости от предназначения преобразователя. Поскольку данные преобразователи часто являются источниками высокочастотных импульсных помех для общей сети 110–250 В, то на вход выпрямителя Vs таких источников устанавливают конденсаторы X2.

Для подавления импульсных помех BM разработана модель В43. Она является самой новой в серии конденсаторов X2 и призвана объединить в себе все достоинства конденсаторов данного типа, изготовленных с применением полипропиленового диэлектрика.



Рис. 5. Пленочный конденсатор X2 серии В43

Серия В43 (рис. 5) соответствует требованиям стандарта IEC 60384-14 для конденсаторов X2. Диапазон емкости — 0,1–25 мкФ с интервалом рабочих напряжений 310–350 Vac. По результатам европейских тестов, конденсаторы BM имеют увеличенное значение начального напряжения частичного разряда (PDIV/Согон) по сравнению с конденсаторами без внутреннего последовательного соединения. Основные характеристики устройств указаны в таблице 2. Металлизация электродов в активной зоне выполнена без использования цинка. В качестве наполнителя применяется новая высококачественная эпоксидная смола. После испытаний на устойчивость к влажности (при +85 °C) с относительной влажностью 85% со смещенным напряжением в течение 1000 ч, среднее значение ΔC/C составляет менее 5%.

Таблица 2. Технические характеристики конденсаторов серии В43 от BM

	310 В AC 50/60 Гц	350 В AC 50/60 Гц
Рабочее напряжение	310 В AC 50/60 Гц	350 В AC 50/60 Гц
Постоянное напряжение, В DC	560	630
Емкость, мкФ	0,1–25	0,1–20
Отклонение емкости, %	±5, ±10, ±20	
Рабочая температура, °C	-40...+110	

Для производства конденсаторов X2 применяют два типа диэлектриков: полипропиленовую (PP) и полиэфирную пленку (PET). Их сравнительные характеристики приведены в таблице 3. PET обладает высокой диэлектрической прочностью, хорошими свойствами

**Таблица 3.** Сравнительная таблица свойств материалов PP и PET для производства конденсаторов класса X2

	PET	PP
Диэлектрическая постоянная (при +25 °C/50 Гц)	3,2	2,2
DF при 1 кГц, tanδ, в %	0,5	0,02
Сопротивление изоляции, МОм·мкФ	25 000	100 000
Диэлектрическое поглощение, %	0,2	0,05
Дрейф емкости ΔC/C, %	1,5	0,5
Уровень поглощения влаги, %	0,4	0,01
Максимальная рабочая температура, °C	+125	+100
Температурный коэффициент, ppm/°C	+400, ±200	±200, ±100

самовосстановления и температурной стабильностью. У PET положительный температурный коэффициент материала. PP обладает превосходными электрическими характеристиками, имеет очень низкие диэлектрические потери на высоких частотах, высокое сопротивление изоляции, низкое диэлектрическое поглощение и высокую диэлектрическую прочность. Кроме того, PP имеет отличную влагостойкость и очень хорошую долговременную стабильность параметров. Температурный коэффициент материала — отрицательный.

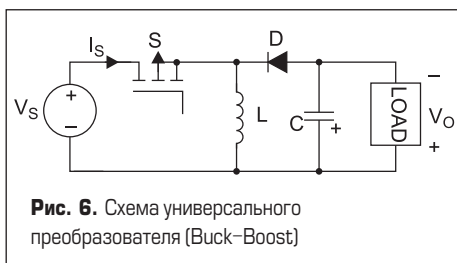
Металлизированные пленочные конденсаторы ВМ соответствуют стандартам IEC61071. Это означает, что они могут обрабатывать несколько скачков напряжения в два раза выше номинального напряжения без значительного сокращения срока службы изделия. Следовательно, разработчику требуется только учет номинальных требований к напряжению при настройке схемы.

**Универсальный преобразователь**

Универсальный преобразователь (рис. 6) — это тип SMPS, который сочетает в себе принципы понижающего и повышающего преобразователей в одной схеме. В таких схемах величина выходного напряжения может быть больше или меньше входного напряжения. Выходное напряжение имеет противоположную полярность на входе. Один из возможных недостатков этого преобразователя, который усложняет схему возбуждения дросселя, заключается в том, что импульсный переключатель не имеет клеммы на землю.

**Дроссели для импульсных преобразователей**

Дроссель состоит из катушки проволоки, намотанной на ферромагнитный сердечник.



**Рис. 6.** Схема универсального преобразователя (Buck-Boost)

Данная комбинация дает индуктивность (L), которая создает сопротивление, поэтому ток, протекающий через индуктор, не может мгновенно измениться. Скорость изменения тока через индуктор (dI/dT) определяется индуктивностью и напряжением, воздействующим на индуктор:

$$V = L \times dI/dT.$$

Ферромагнитный материал сердечника позволяет сохранять энергию в дросселе. Когда напряжение падает и ток увеличивается, то эта накопленная энергия возвращается в цепь. Когда переключатель S закрыт, ток, текущий к нагрузке, увеличивается, а энергия сохраняется и накапливается в индукторе. Когда переключатель S разомкнут и выход отключен от входа, стабильный выходной ток поддерживается путем вытягивания энергии из катушки индуктивности. Поскольку индуктивность влияет на соотношение dI/dT, ее значение выбирается максимально близким для достижения желаемых пределов тока пульсации (I<sub>ripple</sub>), обеспечивая постоянный выходной ток. Индуктор может удерживать только определенное количество энергии. После того как ферромагнитный материал будет насыщен, индуктивность уменьшится, а пульсации тока возрастут. Пиковый ток для схемы (I<sub>pk</sub>) рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{pk} = I_{out} + I_{ripple} / 2,$$

При выборе индуктивности важно проверить, чтобы у применяемого компонента ток насыщения сердечника (I<sub>sat</sub>) был больше, чем расчетный пиковый ток (I<sub>pk</sub>).

**Потери в дросселях**

Потери в медной обмотке дросселя обусловлены эффективным током (I<sub>rms</sub>), которому создается сопротивление (Rdc):

$$P_{cu} = R_{dc} \times I_{rms}^2$$

В спецификациях на компонент обычно указывается заданный ток повышения температуры (Temperature Rise Current), эквивалентный значению постоянного тока, приводящего к повышению температуры на 40 °C от стандартных значений. Номинальный ток индуктора (Rated Current) — это ток, при котором температура компонента не будет расти более чем на 40 °C от стандартных значений.

Механизм потери тока в сердечнике — довольно сложный процесс. Изменяющийся ток в силовом индукторе создает изменяющуюся плотность потока (B AC), и сопротивление основного материала (феррита) имеет свойство противостоять этому потоку (B AC). Потери в сердечниках зависят от типа материала сердечника, размера, B AC и частоты переключения импульсной схемы (F).

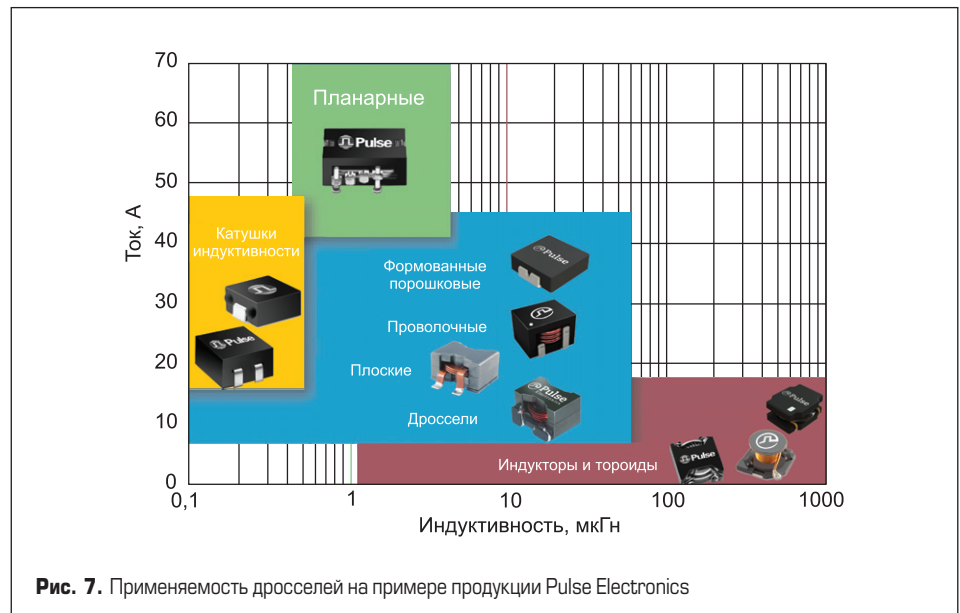
Чем подробнее спецификация на выбираемый компонент (силовой дроссель), тем проще рассчитать рабочие характеристики материала и размеры сердечника. В техническом описании также может указываться ток повышения температуры, поэтому при превышении данного значения нужно будет помнить о том, что потери в сердечнике будут высоки, и индуктор достигнет указанного лимита температуры при более низком среднеквадратичном токе из-за дополнительного воздействия потерь мощности и повышения температуры обмотки.

Рассмотрим выбор дросселей Pulse для импульсного источника питания.

Для обеспечения требований к соотношению индуктивности и тока в преобразователях существуют различные виды корпусов и типы обмоток дросселей (рис. 7).

**Индуктивности на ферритовом сердечнике**

Индуктивности серии PA (рис. 8) состоят из специальной медной проволоки, намотанной на ферритовый сердечник, при этом сердечник может быть как магнитно-экранирован, так и не экранирован. Неэкранированная версия может поддерживать относительно высокие



**Рис. 7.** Применяемость дросселей на примере продукции Pulse Electronics





**Рис. 8.** Индуктивности серии PA (Pulse Electronics)

пиковые токи перед насыщением. Из-за открытой траектории потока открытый сердечник ограничен рабочей частотой и создает электромагнитные помехи на компоненты схемы. Если это условие подходит для применения, то данный тип является оптимальным решением для преобразователя, так как это самый недорогой вид дросселя. Экранированная версия немного дороже и подходит для высокочастотных и чувствительных к шуму схем. Он имеет очень широкий диапазон индуктивности, но ограничен токопроводящей способностью. Применяется в низковольтных преобразователях.

**Дроссель с тороидальным ферритовым сердечником**



**Рис. 9.** Дроссели серии PE (Pulse Electronics)

В дросселях серии PE (рис. 9) используется толстая обмотка. Компонент является относительно громоздким и имеет сравнительно большие потери на сердечнике на высоких частотах. Основными ограничениями тороида являются размер и производительность. Тороид может быть хорошим решением, когда текущие требования превышают характеристики индукторов с сердечником барабанного типа. Экранированные тороидальные индукторы с ферритовым сердечником также доступны в корпусе для поверхностного (SMT) монтажа на печатную плату. Данные дроссели служат универсальными многоцелевыми платформами и помогают минимизировать поток утечек, чтобы защитить соседние компоненты от чрезмерных электромагнитных помех (EMI).

**Дроссели с плоским сердечником**



**Рис. 10.** Плоские дроссели серии PG (Pulse Electronics)

Низкопрофильная серия PG (рис. 10) обладает самой высокой токовой емкостью (60 А) в корпусе высотой 3,2 мм. Это достигается благодаря специальному плоскому проводнику с большим сечением, который намотан в спиральную катушку. Основной материал сердечника — порошкообразное железо с соответствующей мягкой насыщенностью и низким уровнем излучаемых помех. Поскольку падение напряжения в нем обычно невелико, то потери на сердечнике не являются чрезмерными даже на высоких частотах. Плоская катушка индуктивности имеет относительно малое количество витков провода, поэтому данный тип дросселей ограничен низкой индуктивностью и обладает более высокой стоимостью.

**Дроссели со стандартной катушкой**



**Рис. 11.** Стандартные дроссели серии PG (Pulse Electronics)

Дроссели серии PG (рис. 11) (Round Wire Coil, RWC) обычно разрабатываются для устройств, где не требуется низкий профиль. Они используются в качестве устройств хранения энергии и фильтров в регуляторах точки нагрузки (POL) и в качестве дросселей выходного каскада для преобразователя постоянного тока. Индукторы RWC используют материал ферритового сердечника, который дает на 90% снижение потерь в сердечнике и увеличение максимальной рабочей температуры на 30% по сравнению со стандартным материалом из порошка железа, используемого в индукторах с плоской катушкой. Поскольку ферритовый материал невосприимчив к термическо-

му старению, эти индукторы более надежны и лучше работают при более высоких температурах и частотах, чем индукторы с не ферритовым сердечником. Использование круглого провода вместо плоской катушки приводит к снижению стоимости на 25%.

**Экранированные дроссели в ферритовом корпусе**



**Рис. 12.** Дроссели серии PA (Pulse Electronics)

Особенность закрытых порошковых индукторов серии PA (рис. 12) в том, что они имеют железный порошковый материал корпуса, который непосредственно залит на медный провод. Это оптимальное решение для схем, требующих высоких частот и высокого тока с низким сопротивлением постоянному току. Эти индукторы обладают высокими характеристиками по поглощению собственных электромагнитных помех. Экран ограничивает поток помех, устраняет шум и удерживает магнитный поток внутри индуктора. Формованная серия индукторов отлично подходит для высоковольтных, неизолированных DC/DC-преобразователей и регуляторов напряжения. Добавление квалификации AEC-Q200 позволяет использовать эти компоненты и в автомобильной промышленности. Pulse предлагает эти индукторы с расширенным диапазоном рабочих температур (-55...+155 °C).

**Катушки индуктивности**

Катушки индуктивности серии PA (рис. 13) обладают очень низкой индуктивностью при высоких токах. Они предназначены для



**Рис. 13.** Катушки индуктивности серии PA (Pulse Electronics)

низковольтных преобразователей с высокими значениями тока, работающих на высоких частотах переключения. Pulse предлагает экранированные катушки индуктивности для SMT-монтажа, которые объединены в комбинированные и интегрированные типы конструкций. Связанные силовые катушки индуктивности соединяют два (или более) компонента в одну пару с единой магнитной связью между ними, уменьшая общую площадь и обеспечивая более низкий ток пульсаций фазы.

### Планарные дроссели и трансформаторы

В планарных трансформаторах серии PA (рис. 14) используется небольшое количество витков. Выполненные с использованием

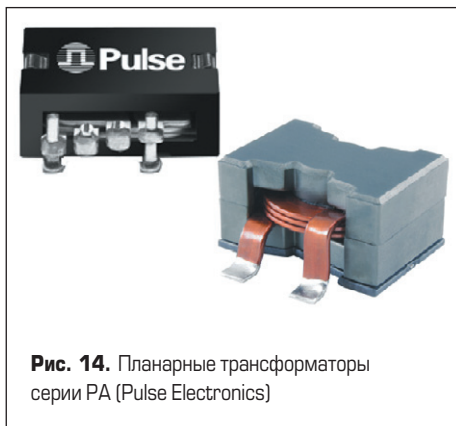


Рис. 14. Планарные трансформаторы серии PA (Pulse Electronics)

штампованных медных пластин или винтовой обмотки катушки, они обеспечивают низкую индуктивность с очень высокой несущей спо-

собностью. Ультранизкий DCR этого трансформатора делает его самым эффективным решением, доступным на рынке сегодня. Pulse имеет экранированные версии плоских катушек с ферритовым сердечником, предназначенные для источников питания с высоким выходным током и низким напряжением. Эта серия имеет дополнительную монтажную площадку для лучшей фиксации на печатной плате.

### Заключение

После того, как определены параметры конденсатора и оптимальный вариант дросселя, конечным шагом является выбор типоразмера дросселя, который будет обеспечивать правильные характеристики преобразователя, а также его геометрию, подходящую для конкретного устройства.