

# DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: СТАНДАРТЫ И ТОПОЛОГИИ



Современные топологии преобразования электрической энергии позволяют обеспечивать широкий диапазон входных рабочих напряжений и высокий КПД. Благодаря этому модульные DC/DC-преобразователи способны удовлетворить требованиям, предъявляемым к шинам питания аппаратуры специального назначения, и одновременно помогают упростить организацию питания всей электроники такого оборудования.

Современные транспортные средства и летательные аппараты специального назначения буквально напичканы самой разнообразной чувствительной электроникой. Электрическая энергия в автомобиле — это, как правило, 24 В постоянного тока, который берется непосредственно от аккумуляторной батареи автомобиля. В то же время в самолете может быть 28 или 270 В постоянного тока или даже 115 В переменного тока, но эта шина питания является нестабилизированной, с помехами и переходными процессами, вызванными изменениями нагрузки на шине, и склонна к различным переходным процессам. Чтобы преобразовать и стабилизировать напряжения, которые необходимы для питания дискретных электрических компонентов, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), элементов памяти, дисплеев, которые являются неотъемлемой частью электронного оборудования, необходимы изолированные стабильные источники питания. Современная тенденция развития аппаратуры специального назначения, а также, не в последнюю очередь, и постоянное ценовое давление, сдвинули рынок DC/DC-преобразователей в сторону модульных решений систем организации питания. Причем с использованием уже готовых к массовому производству и отработанных в техническом отношении решений. По мере того как тенденция продолжает развиваться в сторону все большей миниатюризации, повышения эффективности и улучшения общих технических характеристик таких преобразователей, интеграция непосредственно в них схем подавления переходных процессов, а также использование преобразователей постоянного тока в виде модулей позволяют упростить

конструкцию системы питания в целом. Кроме того, такой подход позволяет улучшить и общую производительность системы с точки зрения ее эффективности, ведет к уменьшению ее массо-габаритных параметров.

## Требования стандартов

Стандарт MIL-STD-1275 (в настоящее время используется редакция E) регламентирует помехоустойчивость аппаратуры специального наземного транспорта военного назначения, питаемой от шины 24 В постоянного тока. В стандарте описаны различные переходные процессы, которые необходимо учитывать при проектировании надежной системы. Так, во время запуска двигателя напряжение может резко опуститься до 12 В, то есть во время первоначального включения имеется короткий провал напряжения, а затем, во время проворачивания коленвала двигателя (а это примерно 30 с), напряжение возрастает до уровня 16 В. Стоит отметить, что редакция D данного стандарта указывает более глубокий первоначальный провал напряжения во время первоначального включения — до 6 В.

Короткие по времени и ограниченные по энергии всплески напряжения до  $\pm 250$  В пикового значения могут возникнуть в результате коммутации нагрузок и, как правило, из-за собственной индуктивности проводов. Эти пики обычно могут быть ограничены кламперами или отфильтрованы. Большие по продолжительности и гораздо более высокие по уровню всплески перенапряжения могут быть вызваны переключением мощных нагрузок или являться результатом резкого изменения нагрузки на синхронный (вентильный) генератор переменного тока. Типичный пример сброса нагрузки такого генератора — это когда большая нагрузка, такая как батарея, внезапно отключается. Генератор не может достаточно быстро уменьшить напряжение на своем выходе, и вместо того, чтобы подавать энергию 28 В в батарею, которую он собирался зарядить, подает ее на шину напряжения постоянного тока, в результате чего имеет место большой перепад напряжения. Этот тип перенапряже-



ний не может быть погашен клампером или отфильтрован. Такие всплески должны быть заблокированы, например посредством специальных последовательно включенных устройств, таких как МОП-транзистор, но наиболее предпочтительно, чтобы такое повышенное напряжение находилось в пределах допустимого входного диапазона напряжений питаемой от данной шины электроники.

Требования к системе электропитания военных самолетов регулируются стандартом MIL-STD-704 (в настоящее время в версии F). В то время как напряжения 270 В постоянного тока и 115 В/400 Гц переменного тока являются общими, еще одно напряжение, которое обычно встречается для питания бортовой аппаратуры, — это 28 В постоянного тока. Указанный выше стандарт детализирует условия нормальной и ненормальной работы, работу в аварийном режиме, а также режим начального включения. Каждый из этих режимов имеет диапазон напряжения в установленном режиме и возможные переходные процессы. Верхняя граница переходного процесса по версии F — 50 В, однако редакция A стандарта, которой часть оборудования по-прежнему должна соответствовать, указывает значение перенапряжения 80 В. Ненормальная работа включает в себя провал напряжения в течение 7 с, при этом непрерывная работа по этому стандарту требует обеспечения устойчивости аппаратуры к таким провалам, что достигается использованием элементов накопления и хранения энергии, например конденсаторной батареи или буферного аккумулятора. Имеется также некоторое оборудование, которое для своего включения после выключения питания допускает перезапуск.

Различные режимы работы и связанные с ними уровни напряжения, установленные согласно стандартам MIL-STD-1275 и MIL-STD-704, приведены в таблицах 1 и 2. Хотя для конкретного приложения может не понадобиться выполнение всех этих установленных условий, но комбинация наихудших вариантов показывает, что общее изменение напряжения может быть в пределах 6–100 В для военных транспортных средств или 12–80 В для воздушных судов. Это достаточно широкий диапазон напряжений для преобразователя постоянного тока, если его воспринимать как диапазон входных рабочих напряжений преобразователя. Коммерческие и телекоммуникационные модули DC/DC-преобразователей обычно имеют диапазон входного напряжения в диапазоне всего лишь 18–36 В. Некоторые специальные приборы военного стандарта имеют лишь немного более широкий диапазон входного напряжения, так что они не могут подключаться непосредственно к шинам питания оборудования специального назначения. Обычное решение этой проблемы заключается в том, чтобы добавить по входу в виде дискретной схемы или отдельного модуля дополнительную защиту от переходных процессов. Однако это дополнительное усложнение противоречит цели сокращения общих габаритов системы электроники. Оптимальное решение для DC/DC-преобразователя — это подавление всех входных переходных процессов по напряжению непосредственно самим модулем.

## Выбор топологии

В большинстве модулей DC/DC-преобразователей используются классические топологии, такие как прямоходовая, двухтактная, полумостовая или мостовая. Все они хорошо изучены и имеют высокую эффективность. Тем не менее они, как правило, недостаточно хорошо работают с широким диапазоном входного напряжения, в первую очередь

Таблица 1. Перечень низкопрофильных модульных DC/DC-источников питания от Linear Technology

Условия	Значение
Начальное возмущение, В	12 (1 с)
Напряжение при провороте двигателя, В	16 (30 с)
Выброс напряжения, В	100 (50 мс, 60 Дж)
Начальное возмущение (в соответствии с редакцией D), В	6 (1 с)
Общий диапазон, В	6–100

Таблица 2. Стандарт MIL-STD-704 D

Нормальный режим, В	Значение
Установившийся режим	22–29
Переходные процессы	18 (15 мс); 50 (12 мс)
Аварийный режим, В	100 (50 мс, 60 Дж)
Установившийся режим	20–31,5
Перенапряжение	50 (50 мс)
Провал напряжения	0 (7 с)
Предельное значение	16–29
Пусковое напряжение	12–29
Переходные процессы (в соответствии с редакцией A)	80 (50 мс)
Общий диапазон	12–80

из-за ограниченного соотношения преобразования и наличия высоких напряжений на ключах.

Удачная альтернатива — это использование обратноходовой топологии, которая является простейшей из всех изолированных топологий. Такой преобразователь имеет один ключ на первичной стороне, еще один дополнительный ключ на вторичной стороне (имеется в виду, при использовании синхронного выпрямления) и общий магнитопроводсердечник, который используется как для изоляции, так и для накопления и хранения энергии. Коэффициент преобразования обратноходового преобразователя —  $nXD/(1-D)$ , где  $n$  — это коэффициент трансформации, а  $D$  — рабочий цикл. Такая топология может практически перекрыть диапазон от  $0,1n$  до  $3n$ . Это гораздо шире, чем коэффициент преобразования в других понижающих топологиях, у которых  $nXD$  практически лежит в диапазоне от  $0,1n$  до  $0,9n$  или даже меньше. Обратноходовая топология характеризуется также низкими напряжениями на обоих ключах, как первичной, так и вторичной сторон.

В то время как обратноходовая топология имеет преимущества в самом широком спектре применений, она часто отвергается для устройств малой мощности или по причине ее низкой эффективности. Основная же причина заключается в том, что в такой схеме присутствуют пульсации как входного, так и выходного токов. Это приводит к высоким среднеквадратичным значениям тока в выходном конденсаторе и, следовательно, высокому уровню пульсации выходного напряжения. Обратноходовая топология также имеет высокие пиковые и среднеквадратичные токи в первичном ключе и выходном выпрямителе, что способствует

снижению КПД. Так что преимущества данной топологии могут быть реализованы, как только перечисленные недостатки будут устранены.

### Обратноходовые преобразователи

Пулсации выходного тока действительно являются проблемой, они возрастают по мере того, как увеличивается мощность. Однако использование конденсаторов с ультранизким значением эквивалентного последовательного сопротивления (Equivalent Series Resistance, ESR), а также многослойных керамических или твердотельных танталовых конденсаторов успешно решает эту проблему. Перечисленные конденсаторы могут выдерживать высокие среднеквадратичные значения токов, сохраняя при этом высокую надежность и обеспечивая низкий уровень пульсаций выходного напряжения. Дополнительным способом уменьшения пульсаций выходного напряжения является применение LC-фильтра.

Высокие потери в выходном выпрямителе могут быть уменьшены с помощью использования синхронного выпрямления. Выходной выпрямительный диод заменяется на МОП-транзистор с низким собственным сопротивлением канала в открытом состоянии и малым зарядом затвора. Такой МОП-транзистор переключается синхронно по фазе с ключом на первичной стороне. Падение напряжения и, следовательно, потери мощности на МОП-транзисторе могут быть ниже, чем у выпрямителя на диодах Шоттки. Вся хитрость заключается во времени управления затвором МОП-транзистора. Однако схемы с непосредственным приводом, в которых открывающее напряжение подается на затвор непосредственно от трансформатора, а также интегрированные решения, как правило, недостаточно эффективно работают в обратноходовых преобразователях с высокой рабочей частотой коммутации. Управление ключами как на первичной стороне, так и синхронными МОП-транзисторами вторичной стороны через ШИМ-контроллер обеспечивает точную синхронизацию, которая, собственно, и является ключом к минимизации потерь мощности. Здесь необходимый сигнал управления затвором может передаваться в цифровом виде через изоляционный барьер.

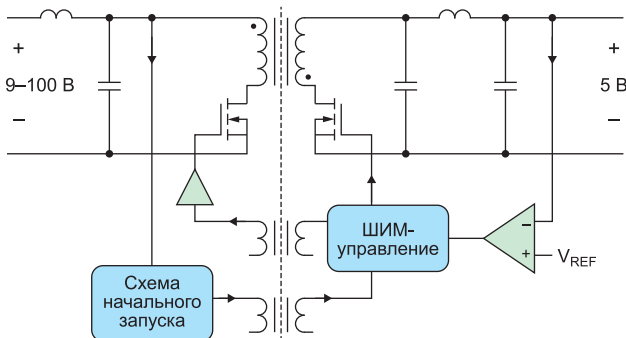


Рис. 1. Топология обратноходового преобразователя с ШИМ на вторичной стороне и управляемого синхронным выпрямителем

При более высоких уровнях мощности выбор топологии обратноходового преобразования по-прежнему является хорошим вариантом. Вместо того чтобы наращивать отдельные компоненты, здесь несколько преобразователей могут быть включены параллельно. Затем эти ступени организуются так, чтобы они работали в определенной фазе, разрешающей их включение, что приводит к уменьшению пульсаций входного тока. Эффект от такого включения является весьма высоким, он значительно снижает среднеквадратичный уровень пульсаций тока во входных конденсаторах. Он также увеличивает частоту пульсации, что позволяет уменьшить габариты подавляющего пульсации фильтра. На рис. 1 представлена топология обратноходового преобразователя с ШИМ на вторичной стороне и управляемого синхронным выпрямителем.

### Габариты и мощность

Повышение эффективности преобразования не только экономит электроэнергию, но и (за счет снижения мощности, рассеиваемой в виде тепла) упрощает решения в части теплоотвода и даже уменьшает количество элементов внешней обвязки, и все это позволяет снизить вес устройства в целом. Эффективность преобразования энергии часто может быть увеличена за счет использования компонентов с большими габаритами, но умный подход к разработке схемы и конструкции заключается в том, чтобы обеспечить и небольшой вес, и меньшие размеры такого DC/DC-преобразователя. Интегрирование схемы подавления переходных процессов входного напряжения непосредственно в модуль DC/DC-преобразователя позволяет уменьшить размеры и простить общее решение, что, в конечном счете, повышает его надежность, а также снижает затраты на производство за счет простоты конструкции, монтажа и настройки.

К примеру, серия VXR изолированных DC/DC-преобразователей компании VPT (рис. 2) отличается широким диапазоном рабочих входных напряжений (9–60 В), может выдерживать выбросы при переходных процессах до 100 В и имеет КПД, достигающий 90%.



Рис. 2. Изолированный DC/DC-преобразователь из серии VXR компании VPT