

# Выбор правильной структуры

## ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

**Во всех областях применения требуются компактные и эффективные источники питания с разумной ценой и превосходными показателями по электромагнитной совместимости (ЭМС). В статье специалиста компании TDK-Lambda объясняется, как выбор структуры источника питания способен в значительной степени влиять на эти ключевые параметры.**

**Эндрю Скиннер  
(Andrew Skinner)**

**Перевод: Виктор Жданкин**

victor@prosoft.ru

Существует много хорошо известных структур, которые вполне соответствуют определенным применениям источников питания (ИП). Но если мы хотим найти оптимальное решение для конкретного приложения, то нам необходимо понимать, как выбор структуры может повлиять на такие основные параметры ИП, как стоимость, габариты, показатели ЭМС и эффективность.

Например, решение с наименьшей стоимостью может быть совершенно отличным от решения с наивысшей эффективностью. Также интуитивно понятно, что решение с наивысшим значением удельной мощности (или с минимальными габаритами) не обязательно будет самым экономичным. При разработке компанией TDK-Lambda новой серии EFE источников питания с высоким значением удельной мощности, предназначенных для применения в качестве входных источников во встраиваемых системах, для определения оптимальной структуры был применен итеративный метод конструирования.

При разработке серии EFE основными критериями были, например, размеры основания корпуса 5×3 дюйма и возможность монтажа в конструктив высотой 1U, мощность в нагрузке 300 Вт при непрерывном режиме работы и скорости охлаждающего воздушного потока 2 м/с, пиковая мощность 400 Вт в течение 10 с, обеспечение всех этих показателей во всём диапазоне входного напряжения 90–264 В переменного тока, уровень кондуктивных помех в сеть электропитания согласно стандартам EN55011, EN55022 по классу В. Еще одним важным требованием разработки было конструирование источника питания с соблюдением проверенных TDK-Lambda проектных норм, учитывающих ухудшение параметров компонентов, расположению компонентов (зазоры и расстояния), нормы разработки печатных плат и т. д.

Эти проектные нормы были успешно проверены инженерами компании TDK-Lambda при разработке предыдущих изделий, и жесткое следование побуждает инженеров, например, не идти на компромиссы только для достижения небольшого размера устройства. К тому же данные нормы важны при создании надежного изделия, которое может быть легко запущено в производство. Зачастую возможно втиснуть много компонентов в небольшое пространство для

получения источника питания с высокой удельной мощностью, но компоненты, которые подвергаются механическим нагрузкам или перегреву вследствие недостаточного объема, будут причиной снижения надежности изделия в целом.

Для того чтобы выбрать наиболее подходящую структуру, необходимо оценить качественные характеристики возможных решений, приведенных в таблице 1, используя способ подсчета баллов. Каждая из структур оценивалась двойкой: во-первых, по показателям эффективности и коммутации, представленным в таблице 2, во-вторых, по сложности схемотехнического решения, показателям ЭМС и другим значимым факторам целевого приложения, приведенным в таблице 3.

Каждой качественной характеристике присвоена оценка от 1 (плохо) до 5 (хорошо), и результаты обоих этапов сведены вместе.

Для рассматриваемых структур в табл. 2 представлен подсчет баллов для параметров, связанных с коммутацией и эффективностью. В общем структуре с мягким переключением и с низкими значениями тока будут предпочтительными.

Основные предметы исследования для качественных характеристик, которые оценивались, следующие:

- Циркулирующая полная мощность ( $V \cdot A$ ) — величина энергии, циркулирующей в схеме, которая не передается непосредственно в питаемую нагрузку. При высоких выходных напряжениях этот критерий имеет наименьшее значение вследствие малых токов во вторичных цепях.
- КПД. Структуры с режимом непрерывных токов и активно управляемыми синхронными выпрямителями будут предпочтительными, несмотря на то, что обычно сложность схемы получает более низкую оценку. При надлежащем выборе компонентов и частоты коммутации значение КПД схемотехнических решений может быть повышено; этот показатель является решающим при оценке объема работ для достижения высокого значения КПД.

Основные качественные характеристики, относящиеся к сложности схемотехнического решения

и показателям ЭМС, а также другие важные факторы, связанные с применением структур, приведены в таблице 3. Далее рассматриваются ключевые результаты для каждого параметра.

- Многоканальный выход. Схемотехническое решение с управлением током без выходной индуктивности является предпочтительным, так как это упрощает механическую конструкцию.
- Не полностью стабилизированные выходные каналы. Там, где требуется несколько выходных каналов (которые отслеживают друг друга с умеренной точностью), схемотехническое решение с токовым управлением и низкой скоростью изменения тока  $di/dt$  на выходе является предпочтительным.
- Габаритные размеры. Как правило, габаритные размеры зависят от числа компонентов силовой части для применений с небольшой мощностью и КПД и даже от потерь мощности в компонентах при высокой мощности.
- Сложность. Структура, которая естественно ограничивает ток, не предъявляет строгих временных ограничений к контроллеру и включает в себя самоуправляемые синхронные выпрямители, имеет в результате лучшую оценку за схему силовой части. Структура, которая предъявляет повышенные требования только к низковольтной части и требует

Таблица 1. Возможные структуры для создания транзисторных преобразователей напряжения

Название	Описание	Схема
Структура NV	Модифицированный LLC-конвертор с коммутацией силовых транзисторов при нулевом напряжении с изменяемой частотой и самоуправляемыми синхронными выпрямителями. Структура запатентована TDK-Lambda	
Полумостовой резонансный LLC-конвертор	Преобразователь с коммутацией силовых транзисторов при нулевом напряжении с изменяемой частотой и управляемыми активно синхронными выпрямителями (самоуправление невозможно)	
Мостовая структура с удвоением тока	Конвертор с регулированием методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с коммутацией силовых транзисторов при нулевом напряжении и выпрямлением с удвоением тока	
Полумостовая структура с удвоением тока	Полумостовой конвертор с ШИМ-регулированием и выпрямлением с удвоением тока	
DC/DC-преобразователь с переключением ZVZC и предварительным стабилизатором	Резонансный преобразователь постоянного напряжения с переключением при нулевом токе и нулевом напряжении: трансформатор постоянного тока с предварительным понижающим стабилизатором (режим управления с нулевым током или в граничном режиме)	
Резонансный преобразователь с коммутацией при нулевом токе (ZCS)	Резонансный преобразователь с переключением силовых транзисторов при нулевом токе с изменяемой частотой	
Квазирезонансный конвертор	Обратноходовой преобразователь, работающий с переключением при минимальном напряжении и активно управляемым синхронным выпрямителем	

Таблица 2. Оценка методов формирования процессов коммутации транзисторов и эффективности

Структура	Коммутация в первичной цепи		Коммутация во вторичной цепи		Циркуляция мощности ВА		Эффективность	
	Включение	Выключение	Включение	Выключение	Низкий уровень выходного напряжения	Высокий уровень выходного напряжения	Неполная нагрузка	Полная нагрузка
Структура NV с самоуправляемым синхронным выпрямителем	ZVS	ZVS	ZVS	Высокая di/dt	4	3	2	4
Полумостовой LLC-конвертор с синхронным выпрямлением	ZVS	ZVS	ZVS	ZCS	3	5	3	5
Мостовой преобразователь с удвоением тока и синхронным выпрямлением	ZVS	ZVS/жесткое	ZVS	Высокая di/dt	5	3	2	5
Полумостовая структура с удвоением тока и синхронным выпрямлением	ZCS/жесткое	ZVS	ZVS	Высокая di/dt	4	3	3	5
ZVZCS — резонансный трансформатор постоянного тока с предварительным стабилизатором	ZVS	ZVS/ZCS	ZVS	ZCS	2	4	2	4
ZCS — резонансный преобразователь с переключением при нулевом токе	ZCS	ZVS	ZVS	ZCS	3	4	4	3
Квазирезонансный преобразователь — синхронный выпрямитель с MOSFET в качестве диода	ZCS	ZVS	ZVS	ZCS	1	3	2	4

Таблица 3. Основные качественные характеристики, связанные со сложностью схемотехнического решения, показателями ЭМС, и другие важные факторы, относящиеся к применению структур

Структура	Многоканальный выход	Не полностью регулируемые выходы	Размеры моделей с низким уровнем мощности	Размеры моделей с большой мощностью	Сложность силовой части	Сложность схемы управления	ЭМС	Широкий диапазон регулирования напряжения
Структура NV с самоуправляемым синхронным выпрямителем	5	4	5	3	4	1	5	2
Полумостовой LLC-конвертор с синхронным выпрямлением	5	5	4	5	4	1	5	2
Мостовой преобразователь с удвоением тока и синхронным выпрямлением	2	3	1	5	3	2	5	2
Полумостовая структура с удвоением тока и синхронным выпрямлением	2	3	2	5	2	4	3	5
ZVZCS — резонансный трансформатор постоянного тока с предварительным стабилизатором	5	4	4	4	4	4	5	3
ZCS — резонансный преобразователь с переключением при нуле тока	5	4	4	2	5	3	4	2
Квазирезонансный преобразователь — синхронный выпрямитель с MOSFET в качестве диода	5	5	5	1	5	5	4	3

Таблица 4. Взвешенные оценки для источника питания EFE300 (TDK-Lambda)

Структура	Взвешенная оценка	Комментарии
Структура NV с самоуправляемым синхронным выпрямителем	0,89	Непрерывный выходной ток
Полумостовой LLC-конвертор с синхронным выпрямлением	0,86	Высокое значение пульсации выходного тока, требуется активный синхронный выпрямитель с управлением по затвору (на MOSFET-транзисторе)
Мостовой преобразователь с удвоением тока и синхронным выпрямлением	0,64	
Полумостовая структура с удвоением тока при выпрямлении	0,63	
ZVZCS — резонансный трансформатор постоянного тока с предварительным стабилизатором	0,85	Фильтр для тока с высоким уровнем пульсаций
ZCS — резонансный преобразователь с переключением при нуле тока	0,75	
Квазирезонансный преобразователь — синхронный выпрямитель с MOSFET в качестве диода	0,9	Фильтр для тока с очень высоким уровнем пульсаций

- простого контроллера, будет иметь лучшую оценку за сложность схемы управления.
- Сложность является также мерой стоимости: как правило, сложная структура с большим числом компонентов потребует больше труда при производстве. Ожидаемые затраты на компоненты будут также высокими по двум причинам. Во-первых, сложные структуры имеют тенденцию быть менее популярными, и, следовательно, интегральные схемы контроллеров для них продаются в меньшем объеме; используется кристалл с большей площадью или требуется корпус с большими габаритами и многочисленными выводами. Вторая причина, особенно при низких значениях мощностей, состоит в том, что структура, как правило, требует больше устройств и будет иметь тенденцию к использованию относительно небольших кристаллов, увеличивая в результате относительную стоимость компоновки устройства.
  - ЭМС. Структуры с коммутацией при нуле напряжения (zero-voltage switching — ZVS) в первичной части будут иметь лучшую оценку, так как у них зачастую меньший уровень кондуктивных помех.
  - Широкий диапазон регулировки напряжения. Структуры, в которых применяется коммутация при нуле напряжения, часто используют ток намагничивания трансформатора. В случае, когда необходимо изменять выходное напряжение в широком диапазоне, ток намагничивания будет также изменяться, что приведет к изменению ЭМС, КПД и к повышенной нагрузке компонентов. Поэтому многие структуры с мягким переключением работают с ограниченным диапазоном выходного напряжения по срав-

нению со структурами с обычным ШИМ-управлением и жестким переключением. Взвешенные оценки учитывают наиболее важные факторы для изделий с высокой удельной мощностью (размеры и КПД) и являются комплексными, в отличие от оценок, учитывающих только фактор сложности (цифровое управление требует применения схем со сложными алгоритмами управления, например, при выборе приемлемой конструкции). Высокочастотные помехи также учитываются во взвешенной оценке, так как уровень помех согласно классу В является проектным параметром. В результате взвешенного учета факторов были получены данные, приведенные в таблице 4. Существуют четыре структуры, которые имеют одинаковые оценки.

Низкий уровень пульсаций тока в выходном фильтре структуры NV делает ее предпочтительным выбором при интересующем уровне мощности и заданных размерах. При площади основания 5×3 дюйма число выходных фильтрующих конденсаторов имеет предел вследствие ограничений на реальную площадь печатной платы и может привести к работе электролитических конденсаторов с высокими пульсациями тока, что приведет к дополнительному нагреву и уменьшению срока службы устройства. Так как достижимая рабочая частота в структуре NV относительно высокая, используется несколько керамических конденсаторов, что позволяет в результате получить компактную конструкцию выходного фильтра и увеличить срок службы изделия.

Промышленные рынки, которые являются целевыми для TDK-Lambda, часто требуют источников питания, которые имеют характеристики, модифицируемые с учетом требований конечного применения, такие как нестандартные выходные напряжения, измененные динамические параметры петли обратной связи, модифицированные сигналы и т. д. Эти требования легко удовлетворить за счет применения цифрового управления преобразованием напряжения. При цифровом управлении может быть реализован любой закон управления, так что можно не беспокоиться о слишком сложном алгоритме управления резонансным конвертором, поэтому источники питания серии EFE были разработаны с 8-разрядным микроконтроллером для управления резонансным конвертором и вспомогательными функциями.

Несмотря на то, что с подобной выходной мощностью доступны изделия на основе структур LLC и DC/DC-преобразователя с предварительным стабилизатором, требо-

вания компании TDK-Lambda к проектированию изделий с высокой надежностью не допускают небольших расстояний между компонентами, которые необходимы для адаптации этих структур к формату 5×3 дюйма.

Выбор правильной структуры является важным для успешной разработки новой продукции и требует основательного знания всех доступных вариантов. Правильный выбор позволяет создать изделие с оптимальной стоимостью, характеристиками и показателем надежности. Для источников питания с высокой удельной мощностью, таких как модули серии EFE компании TDK-Lambda, попытка поместить неподходящую структуру ИП в имеющееся в наличии пространство может поставить под удар результаты разработки.

### Рекомендуемая литература

1. Жданкин В. К. Цифровое управление преобразованием напряжения — это уже реальность // Силовая электроника. 2009. № 1.
2. Рабинович Е. В. Источники питания открытого исполнения // Новости электроники. 2009. № 4.
3. Лукин А. В. Высокочастотные преобразователи постоянного напряжения и их классификация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 1998. № 1.
4. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера. 2006.
5. Жданкин В. К. Некоторые особенности проектирования источников питания для медицинского электрооборудования // Силовая электроника. 2007. № 2.
6. LLC resonant half-bridge converter design guideline. Application Note AN2450. ST Microelectronics. 2007.
7. Half-bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-series Fairchild Power Switch (FPS™). Application Note AN-4151. Fairchild Semiconductor Corporation. 2007.
8. Yong Ang. Synchronous rectifier reduces conduction loss in LLC resonant power supplies. Application Note AN69. Diodes Incorporated. 2009.
9. Евстифеев А. Построение высокоэффективных квазирезонансных источников питания с синхронным выпрямлением на основе контроллеров Renesas HA16163 // Силовая электроника. 2007. № 2.

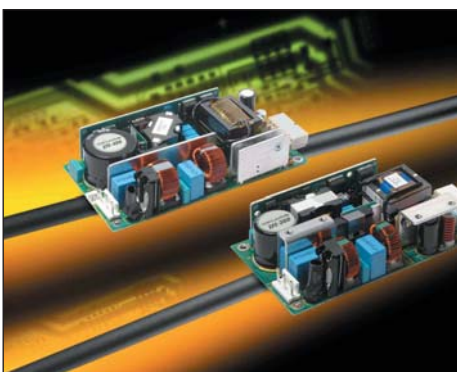


Рисунок. Внешний вид источников питания AC/DC серии EFE с цифровым контуром управления