

Низкопрофильные 120-Вт DC/DC-преобразователи

с высоким значением удельной мощности — результат повышения общей эффективности передачи энергии

Одной из задач проектирования модулей DC/DC-преобразователей является их миниатюризация, то есть получение заданной мощности при минимальном объеме, который определяется необходимой поверхностью охлаждения. Гибридная технология позволяет уменьшить объем конструкции модуля до величины, определяемой только рассеиваемой мощностью и условиями теплоотвода.

Виктор Жданкин

victor@prosoft.ru

Одной из тенденций передовых конструктивно-технологических решений современных систем электропитания является их низкопрофильность. Для обеспечения низкопрофильности конструкции необходимо уменьшить объем силового трансформатора, который во многом определяет массу и объем конструкции, с сохранением оптимального режима передачи энергии в нагрузку. В статье рассматривается способ улучшения конструкции 120-Вт однокантного прямоходового преобразователя, выполненного по гибридно-пленочной технологии, который приводит к упрощению конструкции силового трансформатора: исключаются дополнительная размагничивающая обмотка и рекуперационный диод, уменьшается высота, увеличивается коэффициент заполнения импульсов управления мощным силовым транзистором до 0,67. В результате обеспечивается высокая удельная мощность свыше 4000 Вт/дм³ при КПД 87% и объем, который определяется необходимой поверхностью охлаждения.

Резкий скачок вперед после длительного восходящего продвижения с очень маленькими приращениями

удельная мощность DC/DC-преобразователей сделала с началом производства компанией Crane Electronics (в настоящее время поставляет продукцию под торговой маркой Interpoint) в 1992 г. DC/DC-преобразователя серии MFLHP. DC/DC-преобразователь с выходной мощностью 100 Вт, выполненный по толсто пленочной гибридной технологии, занимал объем менее 0,03 дм³ (габаритные размеры корпуса 76,33×38,23×10,16 мм), обеспечивая удельную мощность, превышающую 3000 Вт/дм³ (3373 Вт/дм³). Это устройство ознаменовало начало эры DC/DC-преобразователей с весьма высокой удельной мощностью [1]. В настоящее время лучшие образцы современных прямоходовых однокантных DC/DC-преобразователей, выполненных по толсто пленочной гибридной технологии, демонстрируют значение удельной мощности более 4000 Вт/дм³. Например, предлагаемые в настоящее время компанией Crane Electronics устройства серии MOR характеризуются значением удельной мощности 4048 Вт/дм³ (модели MOR2815S и MOR2815D). На рис. 1 показаны конструкции корпусов DC/DC-преобразователей серии MOR в различных исполнениях.



Рис. 1. Внешний вид DC/DC-преобразователей серии MOR в различных конструктивных исполнениях: а) в корпусе U2 с горизонтальным расположением выводов; б) корпус W с выводами, изогнутыми вверх под углом 90°; в) корпус Z с выводами, изогнутыми вниз под углом 90°

В чем же причины такого достижения? Если бы импульсный источник питания был зданием, то индуктивные элементы были бы его фундаментом. Задача оптимизации параметров электромагнитных устройств по совокупности объемных и энергетических показателей является важной при проектировании источников питания. Электромагнитные компоненты осуществляют передачу энергии первичного источника во вторичную часть (нагрузку). Для достижения резкого скачка в значении удельной мощности специалисты компании Interpoint, занимающиеся разработкой изделий силовой электроники, тщательно изучили фундаментальные основы передачи энергии — конструкцию индуктивных элементов, структуру преобразователя и управление. Удельная мощность источника питания зависит от общей эффективности передачи энергии. В случае преобразователей серий MFLHP и MOR это означает новую технологию управления индуктивными элементами, их новую конструкцию и новую систему обратной связи.

Наиболее важным достижением в создании преобразователей была разработка, по существу, новой системы управления, разработанной специально для минимизации потерь в трансформаторе. Эта новая система управления первоначально была названа асимметричной передачей энергии (Asymmetrical Power Transfer, APT), а затем запатентована как метод вспомогательного размагничивания магнитопровода в обратном такте работы (Secondary Flyback Core Reset, SFCR), т. е. во время нахождения транзистора в режиме отсечки [2]. Эта система размагничивания была разработана для преодоления основных ограничений передачи энергии, с которыми всегда сталкивается стандартная конструкция источника питания, — это согласование времени размагничивания, времени прямой передачи энергии и воздействий пиковых напряжений на силовые ключи и выпрямительные диоды.

В однотактном прямоходовом преобразователе напряжения трансформатор выполняет сбалансированную работу по передаче энергии в нагрузку и затем размагничивание сердечника трансформатора для возможности следующего рабочего цикла. Для обеспечения этого баланса созданы различные структуры импульсных источников питания. Например, в двухтактной структуре преобразователя с поочередной работой первичных полуобмоток (за рубежом данную схему называют push-pull converter) баланс обеспечивается двумя первичными обмотками, только одна из которых осуществляет передачу тока в нагрузку в любой фиксированный момент времени. Магнитный поток индуцируется, в то время как одна обмотка проводит ток, и убывает линейно во время проведения тока другой обмоткой. В этой структуре только одна половина объема меди доступна для тока нагрузки в определенный момент времени.

В однотактных прямоходовых преобразователях передача энергии обратного такта в первичный источник осуществляется с помощью размагничивающей обмотки, расположенной на первичной стороне трансформатора [3]. Основная обмотка предназначена для передачи энергии, размагничивающая обеспечивает симметричное размагничивание силовой обмотки в каждом цикле передачи энергии. Вольт-секундное произведение на первичной обмотке силового трансформатора, во время которого энергия передается во вторичную часть, индуцирует поток, который должен быть скомпенсирован во время закрытого состояния транзистора размагничивающим потоком сердечника. Площадь, используемая размагничивающей обмоткой, недоступна для тока нагрузки, и время открытого состояния транзистора, как правило, ограничено до 50% для поддержания симметрии передачи энергии. Увеличенные интервалы открытого состояния могут быть достигнуты за счет наличия нескольких дополнительных витков в размагничивающей обмотке. Однако это повышает воздействие выбросов напряжения на силовой ключ и выпрямительные диоды, что требует применения компонентов с высокими рабочими напряжениями и большими потерями проводимости. Обе структуры — двухтактная и однотактная — требуют применения рассеивающих энергию демпфирующих цепей для защиты от выбросов напряжения, индуцированных токами через индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, особенно при использовании неодинакового числа витков основной и размагничивающей обмоток [4, 5].

Для поглощения энергии, накопленной в индуктивности рассеяния, применялась также схема однотактного прямоходового преобразователя, в которой параллельно первичной обмотке основного трансформатора включены диод и стабилитрон. Фиксированное напряжение стабилитрона обеспечивает отрицательное напряжение

на первичной обмотке силового трансформатора для возвращения магнитного потока в исходное состояние. В этом случае накопленная энергия рассеивается стабилитроном. Существуют основные ограничения при использовании этого метода размагничивания трансформатора. Во-первых, магнитный сердечник трансформатора работает только в первом квадранте характеристики $B = f(H)$, а третий квадрант не используется. Во-вторых, максимальный коэффициент заполнения импульсов управления мощным транзистором по существу ограничен значением 0,5. Несмотря на то, что максимальное значение коэффициента заполнения может быть увеличено путем увеличения рабочего напряжения стабилитрона, требования к блокирующему напряжению основного ключа и выпрямительных диодов будут пропорционально возрастать. Это нежелательно, так как повышение рабочего напряжения компонентов увеличит потери проводимости как основного ключа, так и выпрямительного диода [4].

Следствием данных ограничений являются определенные недостатки: необходимость в большем магнитопроводе трансформатора по сравнению с некоторыми другими структурами преобразователя; более высокое среднеквадратическое значение тока, приводящее к увеличению потерь энергии; повышение пульсаций тока, влекущее за собой чрезмерные электромагнитные помехи; рост воздействия тока на основной ключ, что вызывает большие коммутационные потери.

Улучшение передачи энергии

Новый механизм размагничивания магнитопровода силового трансформатора (SFCR) позволяет преодолеть два главных недостатка, присущих существующим методам размагничивания магнитопровода трансформатора однотактных прямоходовых преобразователей: неполное использование магнитопровода трансформатора и ограничение максимальной величины коэффициента заполнения импульсов управления мощным транзистором значением 0,5. Метод SFCR обеспечивает новую схему размагничивания магнитопровода трансформатора в обратном такте для однотактных прямоходовых DC/DC-преобразователей для оптимизации размера трансформатора, повышения эффективности преобразования и уменьшения электромагнитных помех (рис. 2).

В предпочтительной реализации этой конфигурации SFCR используется паразитная емкость размагничивания с выпрямительным диодом вторичной части. Эта паразитная емкость и индуктивность намагничивания трансформатора формируют вторичную цепь размагничивания в обратном такте, период резонанса которой определяется емкостью, приведенной к первичной стороне, и индуктивностью. В то время когда силовой транзисторный ключ открыт, входное напряжение прикладывается к первичной обмотке трансформатора и вызывает ток намагничивания, который, в свою очередь, создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Величина этого тока намагничивания зависит от входного напряжения и интервала времени открытого состояния ключа. При запираании силового ключа, ток намагничивания немедленно отражается во вторичную обмотку

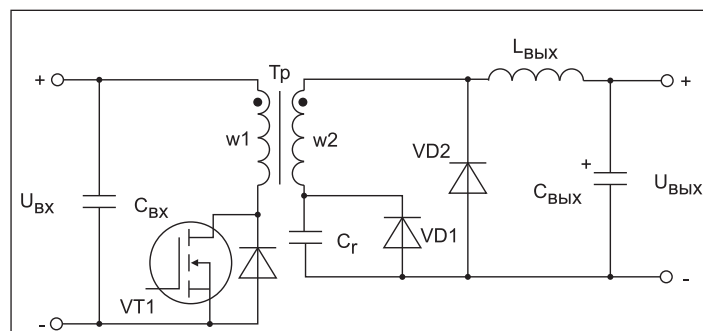


Рис. 2. Структура однотактного прямоходового преобразователя с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием с использованием резонансной цепи, состоящей из индуктивности намагничивания и емкости, образованной емкостями силового ключа, первичной обмотки и всеми емкостями на вторичной стороне, приведенными к первичной стороне, включая емкость выпрямительного диода

трансформатора. Затем дополнительная схема размагничивания в обратном такте инициирует половинный резонансный цикл, который сначала снижает ток намагничивания до нуля, а затем обеспечивает дальнейшее изменение его в обратном направлении с конечным значением, примерно равным начальному. Этот процесс позволяет достичь полного размагничивания магнитопровода трансформатора, и перемещение его магнитного потока проходит симметрично из первого квадранта характеристики $B = f(H)$ в третий. В этом случае максимальное отклонение магнитного потока без насыщения трансформатора в два раза больше по сравнению с обычно используемыми схемами размагничивания. Следовательно, интенсивность использования магнитопровода трансформатора удваивается.

В том случае когда период резонанса вторичной схемы размагничивания в обратном такте будет выбран менее половины периода переключения основного ключа, максимальное значение коэффициента заполнения импульсов управления транзисторным ключом может превышать значение 0,5. До тех пор пока половина периода резонанса схемы размагничивания, включая интервал времени с максимальным коэффициентом заполнения, меньше, чем период переключения основного ключа, перемещение магнитного потока трансформатора будет симметричным между первым и третьим квадрантами плоскости В–Н. В том случае когда это условие не выполняется, перемещение магнитного потока трансформатора будет несимметричным между первым и третьим квадрантами кривой В–Н и с большим перемещением магнитного потока, происходящего в первом квадранте. Это может ограничить использование магнитного сердечника и, к тому же, создать более высокий выброс напряжения на паразитной размагничивающей емкости.

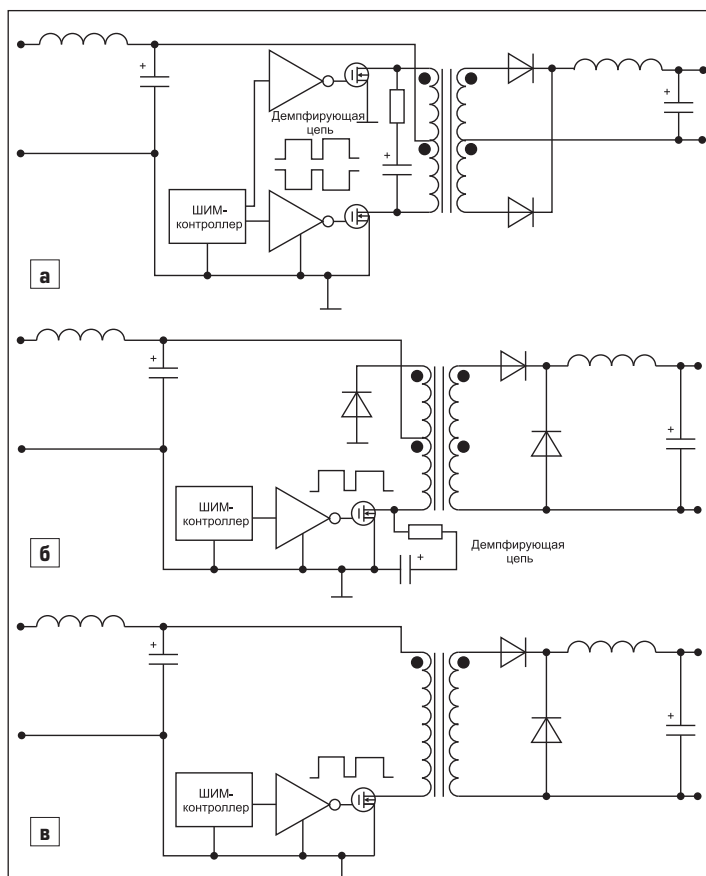


Рис. 3. Различные структуры преобразователей напряжения с различными способами размагничивания магнитопровода трансформатора и уменьшения выброса напряжения на ключах применением демпфирующих цепей, в которых рассеивается энергия, высвобождаемая из индуктивности рассеяния: а) двухтактная структура преобразователя с поочередной работой первичных полуобмоток трансформатора; б) однотактный прямоходовой преобразователь с размагничивающей обмоткой и демпфирующей цепью; в) однотактный прямоходовой преобразователь, выполненный с применением технологии SFCR

Механизм SFCR был создан, когда инженеры группы разработки преобразователей исследовали возможность использования паразитных емкостей и индуктивности рассеяния в преобразователе для обеспечения функции размагничивания основной обмотки. Идея заключалась в том, чтобы направить некоторую часть этой энергии в нагрузку без рассеивания. Путем согласования величины паразитных компонентов с требованиями размагничивания разработчики достигли автоматической и в полной мере симметричной схемы размагничивания магнитопровода однотактного преобразователя, которая увеличивает коэффициент заполнения импульсов управления мощным транзистором до 0,67. Одновременно существенно снижены выбросы напряжения на сопряженных полупроводниковых компонентах.

Результатом является исключение размагничивающей обмотки, что предоставляет больше места для силовой обмотки и возможность использования силовых MOSFET с более низким сопротивлением канала в открытом состоянии и низковольтных выпрямительных диодов. Технология также обеспечивает эффективное подавление выбросов напряжения на стоке ключевого транзистора без использования демпфирующей цепи. Это усовершенствование делает возможным использование всей площади обмотки для передачи энергии — никакая ее часть не теряется для обеспечения функции симметричного размагничивания. Комбинированный результат открытия означает значительно увеличенную эффективность передачи энергии при использовании структуры регулирования с ШИМ-управлением на постоянной частоте, которая обеспечивает низкий уровень помех, работу на постоянной частоте и делает возможной реализацию многоканальной конструкции преобразователя.

Схема SFCR обеспечивает альтернативный способ создания баланса времени размагничивания сердечника, времени прямой передачи и воздействий выбросов напряжения в однотактных прямоходовых преобразователях. В отличие от использования двух первичных обмоток, как, например, в двухтактной структуре со средней точкой первичной обмотки трансформатора (рис. 3а) или с дополнительной размагничивающей обмоткой в традиционной структуре прямоходового преобразователя (рис. 3б), преобразователь, выполненный с применением метода SFCR, использует паразитные элементы для удовлетворения требований к размагничиванию магнитопровода трансформатора (рис. 3 в). В результате имеется увеличенный коэффициент заполнения импульсов управления мощным транзистором до 0,67, снижение выбросов напряжения на полупроводниковых компонентах и рост общей передаваемой мощности, что обеспечивает высокую удельную мощность преобразователя.

Усовершенствованные индуктивные компоненты

Однако сама по себе технология SFCR не могла бы обеспечить достижение высокой удельной мощности DC/DC-преобразователей. Необходимы были дополнительные достижения в конструкции индуктивных элементов. Для получения очень высоких значений удельной мощности в преобразователях серии MFLHP, а затем и серии MOR, используются новые материалы сердечника трансформатора, созданные для увеличения площади медной обмотки, доступной для передачи энергии.

Прежде всего разработчики занялись поиском новых материалов, которые обеспечивали бы оптимальное соотношение геометрических размеров. Целью было установить соотношение параметров, которое бы дало максимум проводящей ток меди и минимизировало объем феррита и длину витков. Новая прямоугольная конструкция обеспечивает высоту, равную примерно половине высоты при использовании обычных магнитных материалов. К тому же новые материалы были разработаны специально для бескаркасной намотки с применением плоских планарных проводников. Путем устранения зазоров, свойственных круглым проводникам, и не используемой в катушках площади новые магнитные материалы обеспечили высокий коэффициент заполнения меди до 80% (стандартные круглые проводники, намотанные на каркас, имеют типичный коэффициент заполнения меди около 50%). К тому же проводники с плоским поперечным сечением снижают потери за счет уменьшения сопротивления проводника на высокой частоте переменного тока. Важнейшими результатами являются

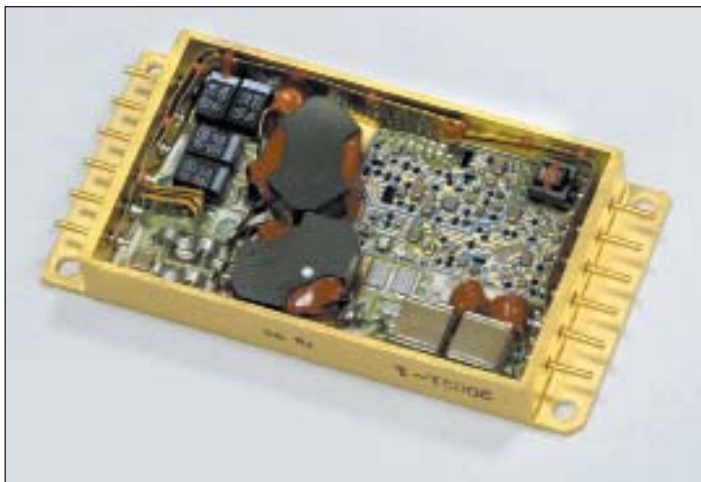


Рис. 4. DC/DC-преобразователь серии MOR в корпусе U2 со снятой крышкой

уменьшение интенсивности скин-эффекта, межвитковой емкости, индуктивности рассеяния и гистерезисных потерь [6]. На рис. 4 показан внешний вид конструкции преобразователя серии MOR со снятой крышкой: хорошо видны низкопрофильные трансформаторы с планарными проводниками.

Даже для пропитки индуктивных элементов используется специальный хорошо проводящий тепло компаунд с небольшими потерями, разработанный для улучшения передачи тепла. Компаунд был выбран ввиду его низкого коронного разряда, небольших потерь, высокой теплопроводности и хорошей тепловой совместимости с ферритовыми материалами.

Высота индуктивного элемента также важна для повышения удельной мощности преобразователей. Так как индуктивные элементы являются самыми высокими в источниках питания, умень-

шение их размеров очень важно для минимизации общего объема источника. Низкопрофильные индуктивные элементы, используемые в преобразователях серии MOR, позволяют уменьшить их высоту до 9,7 мм. Этот размер дает возможность обеспечить меньшее расстояние между платами и сократить площадь всей системы в целом, к тому же меньшая высота преобразователя серии MOR способствует улучшению передачи тепла. Так как наиболее эффективным способом рассеяния тепла для источника питания является использование кондуктивного тракта к теплоотводу (в качестве теплоотвода может служить печатная плата, стенка корпуса аппаратуры, массивные конструкционные элементы системы или специальный металлический радиатор с развитой поверхностью теплоотдачи), дополнительная площадь поверхности обеспечивает лучший общий кондуктивный отвод. Меньшая высота увеличивает площадь поверхности для данного объема. Преобразователь с одинаковым значением удельной мощности при высоте корпуса 12,7 мм имел бы на 24% меньшую площадь проводящего основания для рассеивания тепла, чем при высоте 9,7 мм. При увеличении площади значительно улучшаются условия рассеивания тепла и снижается внутренняя температура модуля, что положительно сказывается на надежности. Для интегральных гибридных конструкций, выполненных в форме прямоугольного параллелепипеда, можно установить достаточно простые соотношения между объемом и поверхностью теплоотвода при заданной высоте корпуса [7]. Кроме собственно индуктивных элементов и системы управления процессами в индуктивных элементах, в преобразователях серии MOR для регулирования используется также метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой и обратной связью по напряжению (voltage-mode), а также контур дополнительной обратной связи по току дросселя (current-mode) — ДОСТД. На рис. 5 показана структурная схема одноканального преобразователя серии MOR. При регулировании с дополнительной обратной связью по току дросселя для прямого регулирования амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки используется внутренний контур регулирования, в то время как основной контур служит для стабилизации выходного напряжения. Применение ДОСТД дает многочисленные улучшения различных характеристик, особенно при рабочих частотах

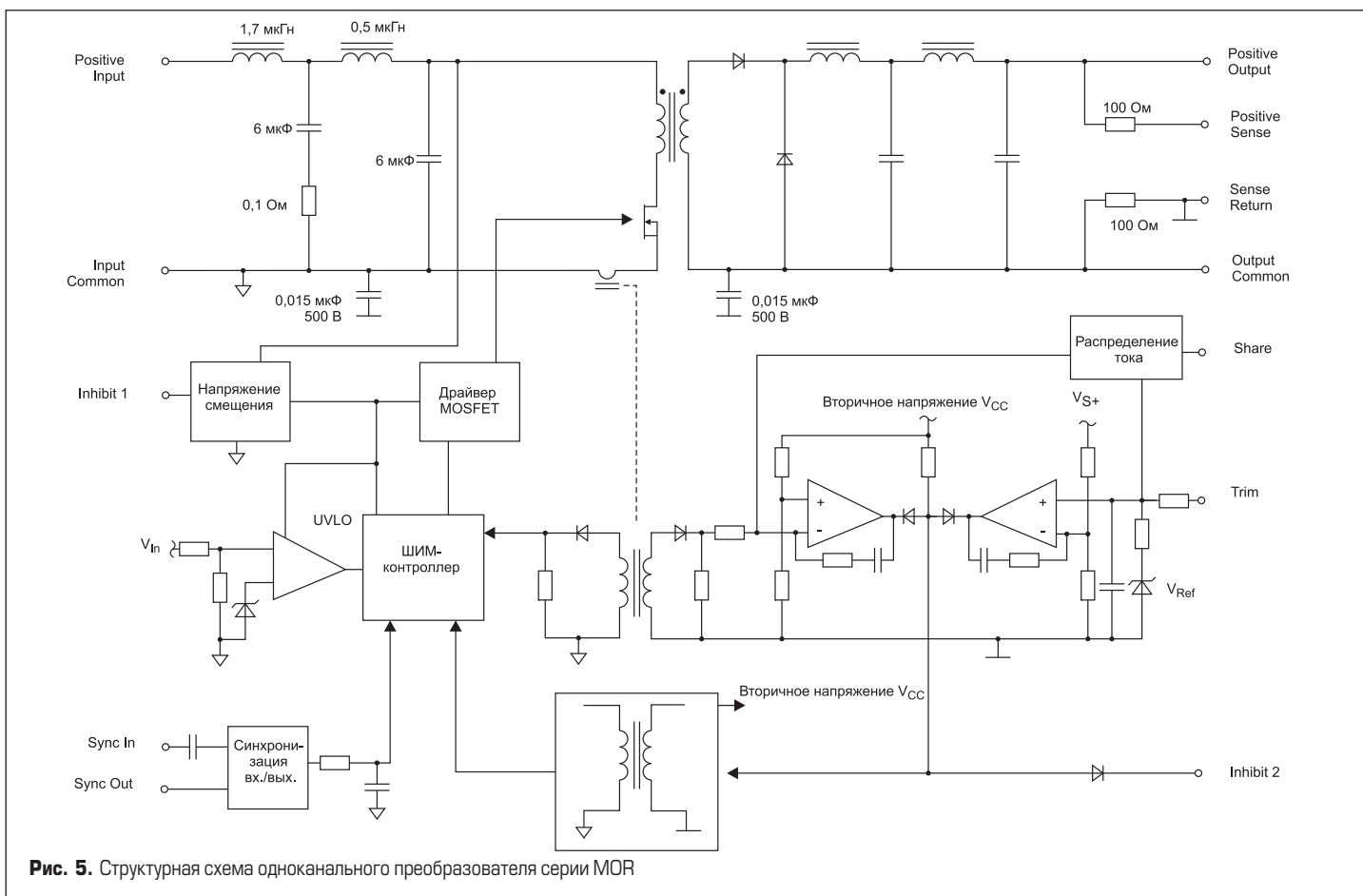


Рис. 5. Структурная схема одноканального преобразователя серии MOR

тах выше 500 кГц. Режим с ДОСТД обеспечивает параметрическую компенсацию отклонений входного напряжения, поцикловое ограничение тока. Параметрическая компенсация отклонений входного напряжения позволяет мгновенно корректировать (без использования динамического диапазона усилителя сигнала ошибки) режим работы источника питания при произвольных изменениях входного напряжения. Благодаря этому нестабильность по сети получается очень небольшой, и режим работы усилителя сигнала ошибки меняется только при изменениях тока нагрузки [8, 9]. Однако этот метод имеет два недостатка: при очень небольших нагрузках ухудшается переходная характеристика, так как ток через индуктивные элементы становится прерывистым, и трудно создать режимы распределения тока при параллельном соединении преобразователей.

Выбор наилучшего режима для разных видов нагрузок

Схема усилителя отклонения тока обеспечивает очень хороший переходный процесс при низких нагрузках и простое параллельное включение преобразователей без сложной схемы межкомпонентного соединения. Тем не менее динамические свойства замкнутой системы находятся под влиянием полного входного сопротивления нагрузки (эффективная полоса пропускания, функция нагрузки, ниже оптимальной во всем широком диапазоне нагрузки). Техника обратной связи преобразователя серии MOR с каскадным усилителем отклонения напряжения и тока сочетает преимущества обеих систем. Она обеспечивает широкую полосу пропускания, нечувствительность к импедансу нагрузки и превосходную переходную характеристику при любой нагрузке. Система с двумя контурами регулирования также упрощает функцию распределения тока при параллельном включении. До пяти одноканальных и двухканальных преобразователей могут быть соединены параллельно без применения внешней схемы, и любой модуль может служить в качестве ведущего или ведомого устройства в схеме с равномерным распределением тока. Кроме того, механизм обратной связи и независимость модулей делают возможными реализацию различных схем синхронизации. Все модули могут быть синхронизированы с использованием системного тактового генератора, либо все они могут работать в автономном режиме (без синхронизации). DC/DC-преобразователи серии MOR могут также быть синхронизированными между собой (выходной сигнал синхронизации одного модуля может быть использован для синхронизации других компонентов системы и других модулей серии MOR), или соединены с системным генератором, или работать в автономном режиме.

Одним из наиболее интересных результатов обратной связи с двумя контурами регулирования является то, что она дает возможность выбирать режим управления выходным напряжением обратной связью по напряжению или дополнительной обратной связью по току дросселя. Режим регулирования с обратной связью по напряжению, который является общепринятым для DC/DC-преобразователей, всегда поддерживает выходное напряжение постоянным. Для нагрузок, которые имеют очень низкое первоначальное сопротивление, пусковые токи могут быть чрезвычайно высокими. При использовании DC/DC-преобразователей серии MOR можно устранить пусковые выбросы (короткие импульсы) путем применения модулей в режиме генератора постоянного тока. В этом режиме выходное напряжение изменяется, чтобы компенсировать изменяющиеся сопротивления. Источники постоянного тока являются идеальными для управления такими нагрузками, как современные микросхемы с широким динамическим изменением тока, и для таких применений, как лампы с очень низким начальным сопротивлением.

Высоконадежные гибридно-пленочные преобразователи серии MOR

DC/DC-преобразователи серии MOR разработаны для применения в высоконадежной аппаратуре, которая обычно связана с аэрокосмическими и военными программами. Модули выполнены по толстопленочной гибридной технологии и представляют собой герметизированные блоки в позолоченном сварном корпусе. Герметизация осуществляется легко вскрываемым паяным швом и последующим

заполнением сухим азотом с избыточным давлением. Модуль сконструирован таким образом, чтобы выдерживать испытания на тонкие и грубые течи в соответствии с требованиями военного стандарта MIL-STD-883F, постоянное ускорение (центрифуга), термоциклирование и электротермотренировку, а также обладать стойкостью к воздействию растворителей, аэрозолей водного раствора солей и вибрации.

Схема обеспечивает соответствие жестким требованиям стандарта MIL-STD-704D к воздействию импульсных помех амплитудой до 50 В длительностью до 120 мс. Внутренняя фильтрация, которая выполнена с использованием низкопрофильных многослойных керамических конденсаторов, обеспечивает чрезвычайно низкий уровень шумов на входе и выходе и надежную работу при высокой температуре. Без применения внешних компонентов преобразователи имеют пульсацию выходного напряжения 20 мВ (от пика до пика) в диапазоне частот от 10 кГц до 20 МГц и максимальное значение пульсации (от пика до пика) входного тока до 130 мА в том же диапазоне частот. А так как в модулях применяется регулирование методом ШИМ с постоянной рабочей частотой, пульсация выпрямленного напряжения, кратная основной частоте, также предсказуема и легко фильтруется. При использовании модулей с внешним фильтром FMCE-1528 обеспечивается соответствие требованиям стандарта MIL-STD-461C Requirements for Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment к уровню кондуктивных помех в диапазоне частот от 30 Гц до 15 кГц (часть CE03) и стойкости к импульсным помехам согласно части CS01 (помехи в диапазоне частот от постоянного тока до 1,5 кГц с величиной 3% от номинального значения подавляются на 40 дБ), а также требованиям стандартов MIL-STD-461D/E/F к уровням кондуктивных помех согласно части CE102 (диапазон частот от 10 Гц до 10 МГц) и CS101 (внешние помехи в диапазоне частот от 30 Гц до 150 кГц). Модули сконструированы также с учетом рекомендаций по обеспечению запасов по отношению к номинальным значениям параметров. Типичные требования стандартов к ограничению номинальных значений диктуют 30% запас (или меньше) для значений тока или мощности, 60% запас для напряжения в установившемся состоянии и 80% или менее для напряжения в переходном режиме (импульсное напряжение).

DC/DC-преобразователи серии MOR способны функционировать в диапазоне температур $-55...+125$ °C (температура корпуса) при широком диапазоне входных напряжений 16–40 В. КПД модулей достигает значения 87%, что минимизирует требования к теплоотводу. Одно- и двухканальные модели обеспечивают выходные напряжения 3,3; 5; 6,3; 9,5; 12; 15; $\pm 3,3$; ± 5 ; $\pm 6,3$; $\pm 9,5$; ± 12 и ± 15 В.

Преобразователи серии MOR оснащены следующими сервисными функциями: дистанционное включение/выключение; блокировка при пониженном входном напряжении; возможность подключения внешней обратной связи; неограниченная защита от короткого замыкания нагрузки. В автономном режиме частота преобразования составляет примерно 550 кГц (минимальное значение 480 кГц, максимальное значение частоты 580 кГц), при синхронизации от генератора тактовых импульсов частота может быть установлена на любой частоте в диапазоне 525–625 кГц.

Закключение

Представленный метод размагничивания сердечника силового трансформатора во время закрытого состояния силового ключа (в обратном такте работы) через резонансную цепь, состоящую из индуктивности намагничивания и паразитных емкостей, позволяет исключить обмотку размагничивания, рекуперационный диод, а также увеличить максимальный коэффициент заполнения импульсов управления мощным транзистором. Упрощается конструкция трансформатора, улучшается использование трансформатора по индукции, так как рабочая точка по кривой перемагничивания проходит в двух квадрантах.

Ограничения применения метода SFCR, защищенного патентом № 5521807 (США), сняты, и он широко применяется в современных конструкциях преобразователей напряжения [10]. Необходимо отметить, что в однотактных прямоходовых преобразователях применяется также цепь активного перемагничивания силового трансформатора, которая позволяет работать преобразователю с максимальным

коэффициентом заполнения, много большим 0,5 с минимальными перенапряжениями на полупроводниковых компонентах и обеспечивает работу с симметричным перемагничиванием в первом и третьем квадрантах В–Н плоскости [11–13].

Литература

1. Maliniak D. 100-W DC-DC Converter Sports 70-W/In³ Density// Electronic Design. March 19, 1992.
2. Pat. № 5521807 (USA) DC-To-DC Converter with Secondary Flyback Core Reset / Ming L. Chen, Jay A. Kuehny // Interpoint Corporation, Redmond, Wash. May 28, 1996.
3. Бас А. А., Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. М.: Радио и связь. 1987.
4. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера. 2006.
5. Дейнеко Д. С. Сравнение структур прямоходовых преобразователей постоянного напряжения // Практическая силовая электроника. 2009. № 36.
6. Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Электромагнитные компоненты преобразователей напряжения // Практическая силовая электроника. 2001 № 1.
7. Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н. и др. Источники вторичного электропитания. Серия «Проектирование РЭА на интегральных микросхемах». М.: Радио и связь. 1983.
8. Гудинаф Ф. Интегральные схемы управления импульсными источниками питания (обзор) // Электроника. 1989. № 23.
9. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: уч. пособие. Серия «Библиотека инженера». М.: СОЛОН-ПРЕСС. 2008.
10. Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. 2011. № 41.
11. Жикленков Д. В., Исаков М. С., Пилягина Ю. В. Особенности проектирования трансформатора прямоходового преобразователя с цепью активного перемагничивания // Практическая силовая электроника. 2004. № 13.
12. Дейнеко Д. С., Кастров М. Ю. Способы размагничивания трансформатора прямоходового преобразователя постоянного напряжения с помощью активного ограничителя // Практическая силовая электроника. 2010. № 37.
13. Голышев В. Способы повышения эффективности импульсных преобразователей // Электронные компоненты. 2008. № 12.