

Эффективные вторичные источники электропитания

Майк Вагнер
(Mike Wagner)

Моше Домб
(Moshe Domb)

Перевод:
Владимир Рентюк

Николай Грунин

nikolay.grunin@ptelectronics.ru

Требования информационных систем к вычислительной мощности, полосе пропускания каналов передачи данных и емкости накопителей неуклонно растут, и центры обработки данных (ЦОД) вынуждены обеспечивать эти потребности, балансируя между расходом электроэнергии и эксплуатационными затратами. Для удовлетворения возросших потребностей приходится расходовать больше энергии, отчего затрудняется охлаждение вычислительного оборудования. Ключевую роль в этом контексте играет компонент блока питания, относящийся к числу важнейших частей каждого сервера, — вторичный источник питания (ВИП), который преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение 12 В для питания расположенных далее устройств.

Чтобы уяснить технико-экономические последствия, вытекающие из этих обстоятельств, необходимо понимать, как на практике взаимодействуют между собой составные части блока питания.

Как правило, сервер нагружает ВИП не полностью или почти полностью, а на уровне 20–30% от максимума. Тому есть две основные причины. Во-первых, ВИП обычно организуются в избыточную систему с конфигурацией $n+1$ или $n+n$, а во-вторых, не всегда серверу для выполнения своих функций требуется большая мощность. Часто он отбирает лишь небольшой процент номинальной мощности ВИП, хотя конструктивно рассчитан на полную мощность.

Недостаток описанного подхода в том, что фактический КПД ВИП оказывается на 10–15% ниже номинального значения при полной нагрузке. Это становится проблемой в ЦОД, где избыточная рассеиваемая мощность, помноженная на количество установленных серверов, делает такой способ эксплуатации экономически невыгодным. В ЦОД наивысшего уровня избыточности и надежности (4 уровень, или Tier 4) каждый киловатт мощности, расходуемой на выполнение вычислительных задач, требует затрат в размере около \$22 000 на инфраструктуру энергоснабжения и охлаждения.

Традиционно производители источников питания максимизировали плотность мощности в каждой конструкции, предусматривая наивысший КПД при нагрузке в 70–80% от максимума, чтобы обеспечить полную мощность в заданном физическом объеме. Для этого приходилось жертвовать КПД при малых нагрузках в диапазоне 20–50% от максимума.

Выбор типа схемотехнического решения и повышение базового КПД

В большинстве ВИП уже используются полномостовые импульсные схемы с переключением при нулевом напряжении (ZVS). Остроумное применение этих схем позволяет обеспечить гибкость, улучшить регулирование тепловых режимов и повысить базовый КПД, а также реализовать надежный подход к проектированию.

Один из возможных способов такого применения — полномостовая схема с переключением при нулевом напряжении в конфигурации «удвоителя тока» с тремя вторичными каскадами. На рис. 1 можно видеть три последовательно соединенных трансформатора, расположенных на первичной стороне.

На вторичной стороне три идентичных каскада включены параллельно, вместо того чтобы использовать один трансформатор. Преимущество этого подхода, в отношении которого подана заявка на патент, — равномерная передача энергии из первичного каскада в каждый из вторичных благодаря тому, что три первичные обмотки соединены последовательно. Тем самым достигается равенство рассеиваемой мощности и одинаковый тепловой баланс, а также естественное перераспределение тока между вторичными каскадами.

На вторичной стороне также используется проприетарная схема фиксации уровня, рекуперирующая энергию обратного тока выходных синхронных выпрямителей, которая обычно рассеивается в виде тепла. Эта схема позволяет рекуперировать около 90% указанной энергии и использовать ее повторно во вторичном каскаде.

Пути повышения общего КПД

Усовершенствовав основное схемотехническое решение, можно повысить КПД и плотность мощности, а также улучшить регулирование тепловых режимов. Все это ключевые факторы, но есть и другие технические подходы к повышению общего КПД источника питания. Грамотно подобранный корректор коэффициента мощности (ККМ) с переключением при нулевом напряжении позволяет увеличить КПД еще на 1%.

Можно также применить полномостовую схему, работающую на три параллельных вторичных каскада на высокой частоте (400 кГц). Ее потенциальные

преимущества — возможность использовать очень низкоомный дроссель, очень низкие потери в магнитопроводе и омические потери в медных проводах, малая занимаемая площадь и при этом дополнительный прирост КПД на 1%. Вторичная цепь с удвоителем тока позволяет снизить тепловую нагрузку, сбалансировав тепловыделение и повысив КПД на 2%.

Наконец, оптимизация времени удерживания выходного напряжения может дать еще 1% к КПД. Реализовав все эти меры, можно добиться очень плоской кривой КПД.

Тонкая настройка ККМ

КПД источников питания уже намного превышает уровни, достигнутые всего несколько лет назад. Чтобы выиграть еще несколько процентов и максимально приблизиться к 100%-му КПД, проектировщикам приходится теперь углубляться в мелкие детали реализации функциональных блоков. В схеме ККМ целесообразно рассмотреть возможность переключения при нулевом напряжении.

С помощью проприетарной цепи можно предотвратить восстановление запиорного слоя в главном диоде ККМ и практически свести к нулю потери на выключение полевых МОП-транзисторов.

КПД при малых нагрузках

На практике многие ЦОД эксплуатируют свое оборудование при невысоких уровнях электрической нагрузки, хотя (в прошлом) источники питания по просьбам клиентов проектировались с расчетом на наивысший

КПД при максимальной нагрузке. Достижение КПД на уровне 90% или выше при небольшой нагрузке — крайне трудоемкая задача, требующая тщательного подхода. У нее не существует какого-то единого, универсального решения: вместо этого приходится принимать ряд отдельных мер, которые в совокупности позволяют повысить КПД при малой нагрузке, не жертвуя им в условиях максимальной нагрузки. Первый шаг — создать базовую модель каждого функционального блока конструкции, чтобы проектировщик мог сосредоточиться на тех аспектах, которые обеспечивают наибольший выигрыш в КПД при малых нагрузках.

Перечислим некоторые способы улучшения характеристик при малых нагрузках (рис. 2).

Наибольший непосредственный выигрыш в КПД можно было бы получить, оптимизировав частоту переключения полномостовой схемы и ККМ. Эта мера аналогична тому, что уже обсуждалось выше, но на самом деле при малых нагрузках работа ККМ на пониженной частоте, измеряемой в килогерцах, позволяет достичь поставленной цели и повысить КПД на 0,5%, не жертвуя характеристиками ККМ и не повышая уровень нелинейных искажений тока.

Вспомогательные цепи вносят весьма крупный вклад в общие потери при малых нагрузках, хотя при полной нагрузке они составляют считанные проценты. Здесь ключевую роль играют мелкие детали. Понизив напряжение источника внутреннего смещения и источника питания вентилятора, можно уменьшить рассеиваемую ими мощность. Обычно в мощном источнике питания форм-фактора 1U имеется два вентилятора, каждый из которых рассеи-

вает мощность 15 Вт. При малых нагрузках рассеиваемую мощность можно снизить вдвое — до 7 Вт. Таким образом, регулируя частоту вращения вентилятора с помощью микроконтроллера, можно добиться повышения КПД на дополнительные 0,5%.

Снижение преднагрузочных потерь в точке нулевой нагрузки дает прирост КПД еще на несколько десятых процента.

Усовершенствовав конструкцию магнитной части главных трансформаторов и выходного дросселя, можно снизить статические (т. е. имеющие место в отсутствие переключения) потери в магнитопроводе, которые при малых нагрузках вносят больший вклад в снижение КПД.

Оптимизация бестоковой паузы в зависимости от нагрузки — еще одна область, где можно найти резервы для повышения КПД. В полномостовой схеме с переключением при нулевом напряжении (ZVS) потери на переключение (P_{zvs}) могут быть значительными: $P_{zvs} = 1/2(C_{oss} \times V_{ds}^2 \times f_{req})$. Продлив бестоковую паузу, можно добиться того, чтобы колебания напряжения сток-исток затухали до нуля, прежде чем транзистор откроется снова. Это позволит существенно снизить потери на переключение (P_{zvs}) при малых нагрузках. С другой стороны, в условиях полной нагрузки КПД будет выше при максимально короткой бестоковой паузе. Есть также необходимость регулировать бестоковую паузу в разных рабочих точках. Это еще одна область, где цифровое управление с использованием микроконтроллера позволяет достичь обеих целей, оптимизировав бестоковую паузу в зависимости от нагрузки и повысив КПД.

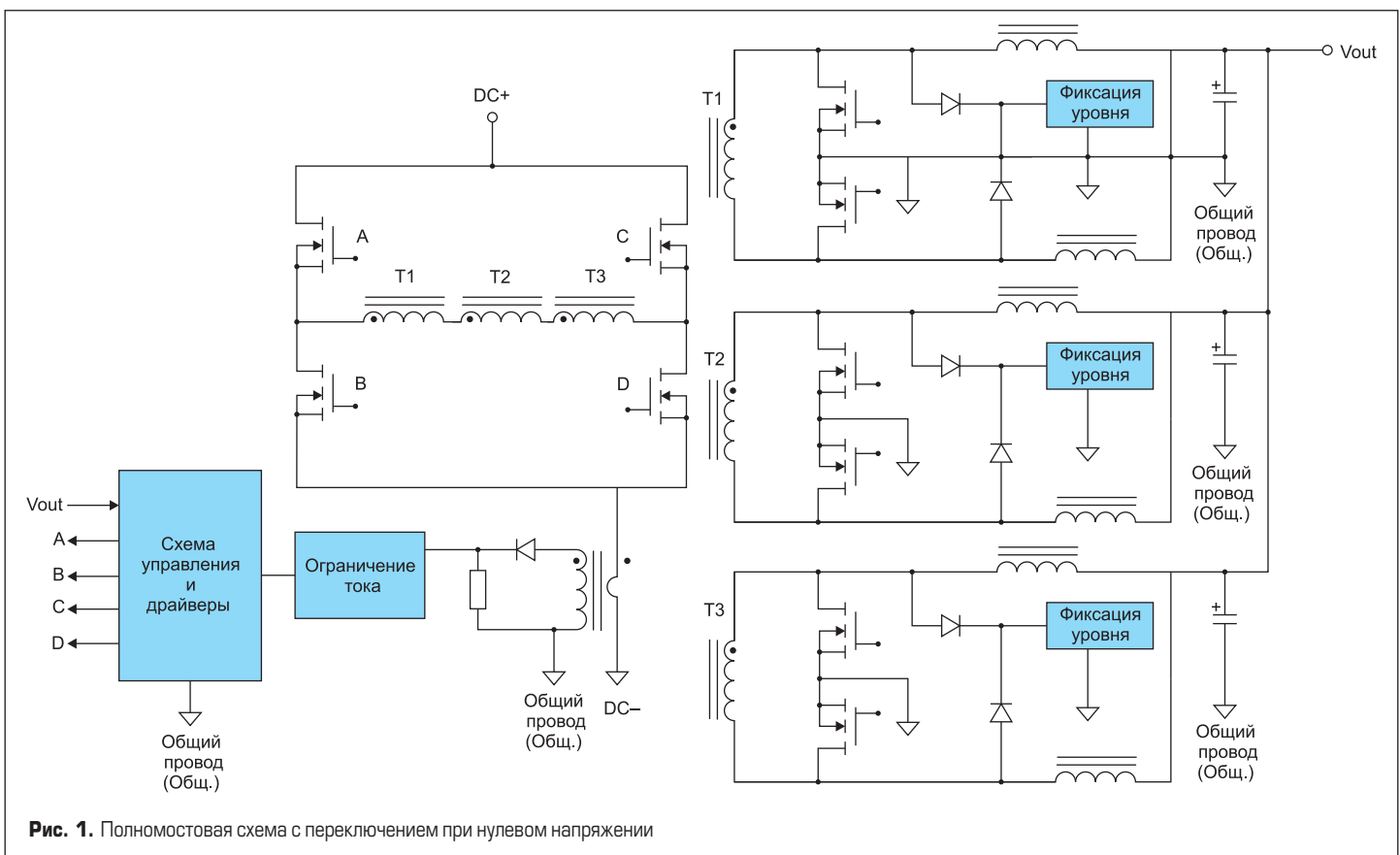
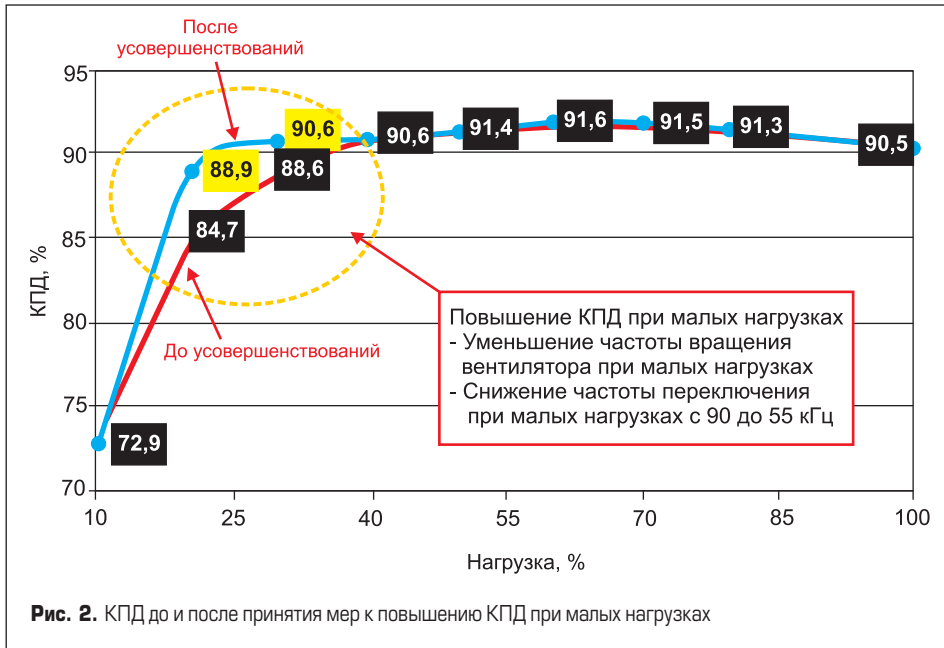


Рис. 1. Полномостовая схема с переключением при нулевом напряжении



Отключение синхронно работающих полевых МОП-транзисторов, ненужных при малых нагрузках, снижает мощность сигнала смещения, необходимого для управления за-

творами. Мощность сигнала смещения рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{drive} = n \times V_{CC} \times Q_{gtotal} \times f_{req}$$

Например, преобразователь Cherokee CAR2512 содержит $n = 24$ синхронно работающих полевых МОП-транзистора, и уменьшение их количества до $n = 12$ при 50%-ой нагрузке позволяет сэкономить около 8 Вт (рис. 2).

Диапазон переключения при нулевом напряжении расширяется путем добавления дросселя L_{res} . Дроссель запасает энергию тока первичной цепи согласно следующей формуле:

$$0,5(L_{res} + L_{leakage}) \times I_{pri}^2 = 0,5(2C_{OSS} \times 380 V^2),$$

где $L_{leakage}$ — суммарная индуктивность утечки всех последовательно включенных трансформаторов, а $2C_{OSS}$ — эквивалентная емкость верхних и нижних полевых транзисторов на первичной стороне.

Найти грамотный компромисс между КПД, стоимостью и габаритами нелегко. Но в том и состоит задача проектировщика, чтобы определить правильное сочетание процентного прироста КПД, форм-фактора, качества выходной электроэнергии, характеристик и стоимости.