

# МНОГОФАЗНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

ВЛАДИМИР ДЕРЕВЯТНИКОВ, инженер

*В тех случаях, когда энергопотребление системы велико, возникает необходимость в повышении эффективности источников питания, уменьшении пульсаций выходного напряжения и сокращении времени протекания переходных процессов. В статье рассматривается один из способов решить эти задачи – использование многофазных понижающих преобразователей.*

Энергопотребление цифровых схем неравномерно и характеризуется всплесками тока потребления. При этом напряжение питания этих схем невелико. Например, рабочее напряжение ядра микроконтроллера, как правило, не превышает 1 или 1,8 В. Источники питания для современных цифровых схем должны обеспечить работу в пределах допустимых отклонений при набросе нагрузки вплоть до 200 А. Возможны и колебания динамической нагрузки до 500 А/мкс.

При переходных процессах, вызванных резким изменением нагрузки, напряжение питания не должно изменяться более чем на  $\pm 3\%$ . В приложениях с токами до 40 А хорошо работают однофазные понижающие топологии, но с ростом токов уменьшается эффективность приложений, и проблемой становится рассеивание мощности. Обеспечение высокой эффективности наря-

ду с быстрым переходным процессом представляет собой другую проблему. Характеристика переходного процесса зависит от коммутационной частоты, но при ее повышении уменьшается эффективность из-за возрастания коммутационных потерь. У многофазного регулятора более высокая эффективность и быстрая переходная характеристика, чем у однофазного понижающего регулятора с эквивалентной мощностью. Многофазная схема состоит из нескольких каскадов однофазных понижающих регуляторов, соединенных параллельно друг с другом для управления общей нагрузкой.

В каждом каскаде регулятора имеется собственная индуктивность и силовые ключи, но входной и выходной конденсаторы используются совместно. Такие высокомоощные приложения как серверы, настольные компьютеры и ноутбуки традиционно оснащены многофазными

понижающими регуляторами. Однако они также становятся востребованными в устройствах с ограниченным пространством, например в смартфонах и планшетах – в приложениях, у которых устойчиво растут потребности в пиковой мощности.

На рисунке 1 иллюстрируется принцип работы многофазного понижающего регулятора с тремя параллельными каскадами, или фазами. Входное напряжение –  $V_{IN}$ ; выходное напряжение –  $V_{OUT}$ ; выходные индуктивности –  $L$ ; входной и выходной конденсаторы –  $C_{IN}$  и  $C_{OUT}$ , соответственно. На этом рисунке также показаны высоко- и низковольтные силовые ключи в каждом каскаде. Каждая фаза включается на одной и той же частоте, но в разное время, что зависит от количества силовых каскадов. Этой схеме трехфазного преобразователя требуются три коммутационных сигнала, смещенных по фазе на  $120^\circ$  ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ).

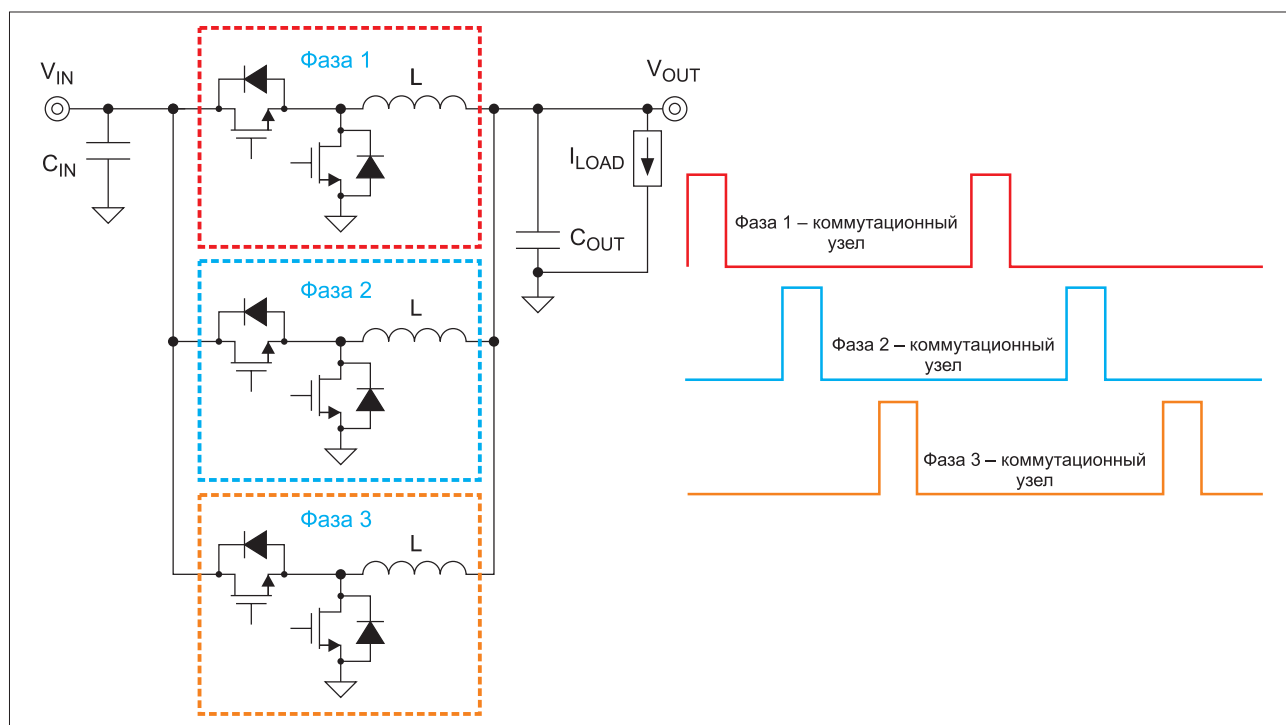


Рис. 1. Трехфазный понижающий регулятор

## МЕТОДЫ МНОГОФАЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Многофазные регуляторы используют одинаковые методы ШИМ-управления – по напряжению или току, как и однофазные устройства. Управление силовыми ключами в верхнем и нижнем плечах осуществляется комплементарно с заданным коэффициентом заполнения  $D$  на основе соотношения между входным и выходным напряжениями. Дополнительные преимущества многофазного преобразователя заключаются в гибком изменении фазовых конфигураций, что позволяет оптимизировать эффективность во всем диапазоне токовой нагрузки.

Многофазные схемы также оснащены стандартными функциями защиты, например от перенапряжения и посадки напряжения, от короткого замыкания, бросков тока и управлением скоростью нарастания выходного напряжения.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ МНОГОФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

У многофазного регулятора имеется несколько преимуществ над однофазной схемой: меньше входные и выходные емкости, лучше тепловая характеристика и эффективность при работе с разными нагрузками и в переходных процессах. Обсудим по порядку каждое из этих преимуществ.

### Меньше входная емкость

Использование нескольких фаз уменьшает среднеквадратичный входной ток через развязывающие конденсаторы и потому уменьшает пульсацию напряжения на входе. По сравнению с однофазной схемой, у суммарного входного сигнала тока многофазного понижающего регулятора меньше пиковое значение и среднеквадратичный ток. В результате не только смягчаются требования к входному конденсатору, но и уменьшается нагрузка на ключ в верхнем плече каждого каскада. Кроме того, упрощается выбор силового транзистора благодаря более широкому ряду доступных компонентов.

На рисунке 2 сравнивается нормализованное среднеквадратичное значение (СКЗ) тока через входные конденсаторы в зависимости от коэффициента заполнения регулятора и количества фаз. Добавление одной фазы может уменьшить среднеквадратичный ток более чем на 50% в зависимости от коэффициента заполнения. В нескольких точках СКЗ тока даже уменьшается до нуля, когда отдельные токи пульсаций каждой фазы взаимно компенсируют друг друга.

Заметим, что на практике не бывает нулевых токов из-за шума приложения,

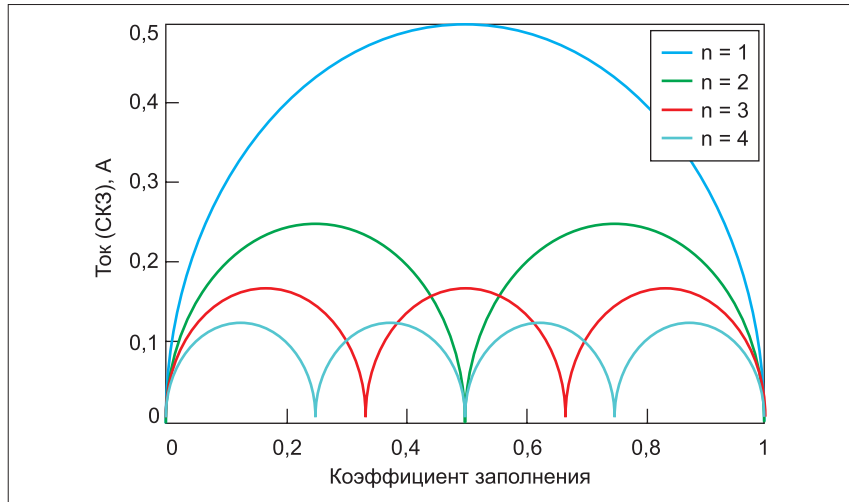


Рис. 2. Увеличение числа фаз позволяет уменьшить нормализованный среднеквадратичный ток через входные конденсаторы

переходных процессов при изменении нагрузки и межфазовых изменений.

### Меньше выходная емкость

В каждом каскаде многофазного регулятора течет тот же ток пульсации, что и в эквивалентной однофазной схеме при тех же условиях эксплуатации. Однако поскольку каскады подключены к общему выходному узлу, их токи индуктивностей суммируются, выходные конденсаторы заряжаются и разряжаются в одинаковое время. Эта работа в параллельном режиме позволяет уменьшить суммарный ток пульсаций.

На рисунке 3 показано, как гасится ток пульсаций в трехфазном преобразователе. Размах сигнала суммарного тока  $I_{\text{SUM}}$  через выходные конденсаторы – меньше, чем у отдельно взятого фазного тока. Благодаря меньшим пульсациям удается соблюсти требования спецификации к выходному напряже-

нию пульсации при меньшей выходной емкости.

Зависимость нормализованного тока пульсаций, который протекает через выходной конденсатор, от числа каскадов, схожа с графиком для входной емкости на рисунке 2 с точками нулевой емкости. И в этом случае нулевые значения выходной емкости на практике не реализуются.

### Улучшение теплового режима и эффективности при высокой нагрузке

Многофазный преобразователь распределяет энергию между несколькими индуктивностями и несколькими силовыми ключами, в результате чего на каждый каскад приходится сравнительно меньше энергии. Таким образом, обеспечивается более эффективная работа каждого каскада, что уменьшает количество компонентов и температуру

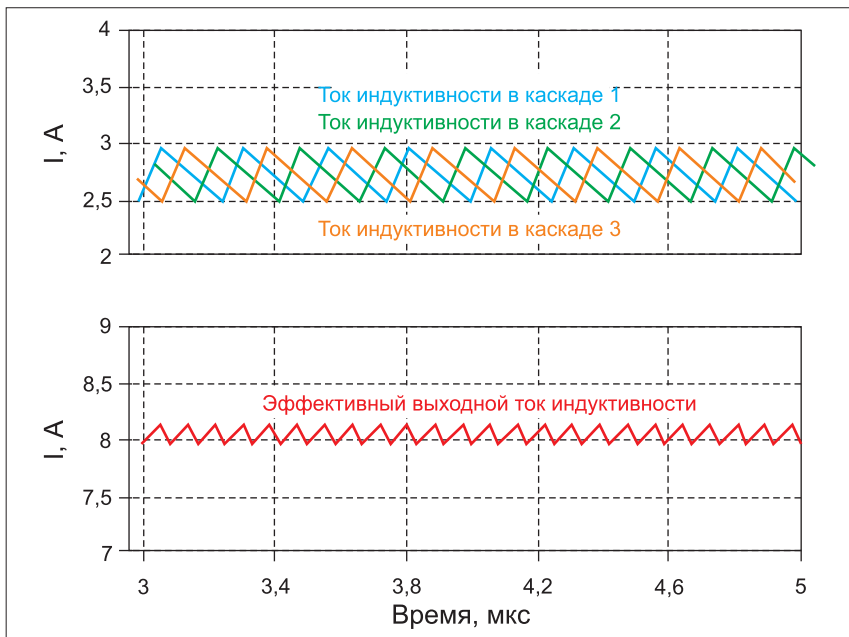


Рис. 3. Гашение тока пульсаций в трехфазном преобразователе

платы, а также предоставляет разработчику более широкий выбор решений.

Многофазный контроллер может изменять количество активных фаз, чтобы максимально повысить эффективность при разных нагрузках. Поскольку потребление нагрузочного тока уменьшается, у контроллера появляется возможность выключать фазы, чтобы уменьшить коммутационные потери и энергопотребление при управлении затвором. В минимальной нагрузке многофазный регулятор может работать с одной фазой, переходя при необходимости даже в режим прерывистой проводимости. И, наоборот, с увеличением нагрузки и преобладанием потерь на проводимость в ключах и индуктивностях контроллер может использовать дополнительные фазы.

Большинство современных многофазных контроллеров допускают регулировку порогов переключения, при которых меняется число работающих фаз преобразователя. Это позволяет оптимизировать работу в соответствии с нуждами конкретного приложения.

#### Усовершенствованная переходная характеристика

В переходном процессе многофазный контроллер может отключать отдельные каскады для изменения фазы при набросе нагрузки или полностью их выключать при ее сбросе. Когда одновременно работает несколько каскадов, их индуктивности работают в параллельной конфигурации. При этом на каждый каскад приходится индуктивность, которая в  $n$  раз меньше эквивалентной индуктивности со стороны выхода, где  $n$  – общее число каскадов.

Благодаря меньшей эквивалентной индуктивности многофазный регулятор имеет возможность быстрее заряжать выходные конденсаторы, что уменьшает величину отрицательного выброса. Каждый дроссель накапливает меньше энергии для заряда выходного конденсатора. Многофазный преобразователь имеет множество преимуществ, но на пути успешной реализации проекта необходимо решить несколько задач. Фазовое управление – возможно, самая сложная из них. Чтобы обеспечить наилучшие рабочие характеристики, схема должна равномерно распределить ток между активными каскадами, подавить пульсации и сбалансировать тепловую нагрузку. Контроллер должен также быстро включать или отключать каскады, чтобы справиться с нагрузкой в переходном процессе.

Реализация этих возможностей сопряжена с дополнительными сложностями. Установка шунтирующего резистора последовательно дросселю или исполь-

Таблица. Требования приложения к 200-А многофазному регулятору

$V_{IN}$	12 В	Входное напряжение
$V_{OUT}$	0,9 В	Выходное напряжение (ном.)
$I_{TDC}$	200 А	Длительно протекающий ток
$I_{MAX}$	240 А	Ток (макс.)
$I_{STEP}$	150 А	Шаг нагружения (макс.)
DCLL	0,5 Ом	Нагрузка по постоянному току
$\Delta V_{OUT(DC)}$	$\pm 1\%$	Пульсация $V_{OUT}$ по постоянному току
$\Delta V_{OUT(AC)}$	$\pm 5\%$	$V_{OUT}$ в переходном процессе
$\Delta V_{IN(DC)}$	240 мВ (размах)	Пульсация $V_{IN}$ по постоянному току
$\Delta V_{IN(AC)}$	$\pm 360$ мВ	Положительные и отрицательные выбросы $V_{IN}$
PMBus с телеметрией	да	Требуется интерфейс PMBus для передачи информации о $V_{IN}$ , $I_{IN}$ , $V_{OUT}$ , $I_{OUT}$ и показаний температуры

зование сопротивления индуктивности по постоянному току – два стандартных метода измерения фазного тока. Оба метода чувствительны к размещению компонентов и трассировке сигнальных трактов. Токочувствительной схеме в каждом каскаде требуются дополнительные пассивные компоненты для фильтрации; шунтирующий резистор также рассеивает лишнюю мощность.

Добавление других каскадов в преобразователь также увеличивает стоимость списка материалов и занимаемое на плате место. Цену дополнительных индуктивностей и ключей следует сопоставлять с более высокой стоимостью надежных компонентов и с необходимостью увеличить количество конденсаторов для реализации однофазного регулятора взамен многофазного. Следует найти баланс между допустимой нагрузкой по току и тепловой характеристикой в зависимости от общего числа фаз.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим некоторые детали разработки многофазного преобразователя для быстродействующего процессора или ПЛИС. Будем исходить из того, что требуется обеспечить ток величиной 200 А при выходном напряжении 0,9 В, входном напряжении 12 В и максимальной нагрузке 150 А.

В таблице перечислены требования рассматриваемого приложения. В спецификации величина длительно протекающего тока  $I_{TDC}$  ограничена тепловым режимом конструкции и равна 200 А;

величина максимального тока – 240 А. Схеме требуется шесть каскадов, чтобы максимальный ток каждого из них не превышал 40 А.

В шестифазном решении на каждый каскад приходится всего 33 А при токе  $I_{TDC}$  и 40 А – при  $I_{MAX}$ , что обеспечивает более управляемый сценарий без потерь. Введение дополнительных каскадов значительно уменьшает количество конденсаторов, необходимых для регулировки в переходном процессе при изменении нагрузки.

Большинство параметров известно разработчикам источников питания, но два из них заслуживают отдельного упоминания. Ток, потребляемый процессорным ядром, динамично изменяется. Ядру, находящемуся в режиме бездействия, требуется очень малый ток. По мере загрузки ядра растет и потребление. Таким образом, многие производители процессоров и DSP используют такую характеристику как DCLL (DC load line – нагрузочная прямая по постоянному току), чтобы определить выходное напряжение регулятора и допуск в заданном диапазоне тока. Поскольку характеристика DCLL линейна, регулятор для нагрузки является чисто резистивным источником.

Допустимое отклонение выходного напряжения регулятора при разных значениях нагрузочного тока называется полем допуска (см. рис. 4). В рассматриваемом случае допуск по DCLL составляет 0,5 мОм. Power Management Bus (PMBus) – двухпроводной стандартный интерфейс,

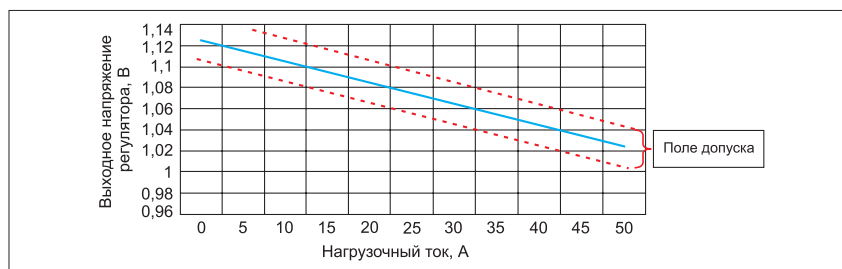


Рис. 4. 2-мОм нагрузочная прямая ядра ЦП

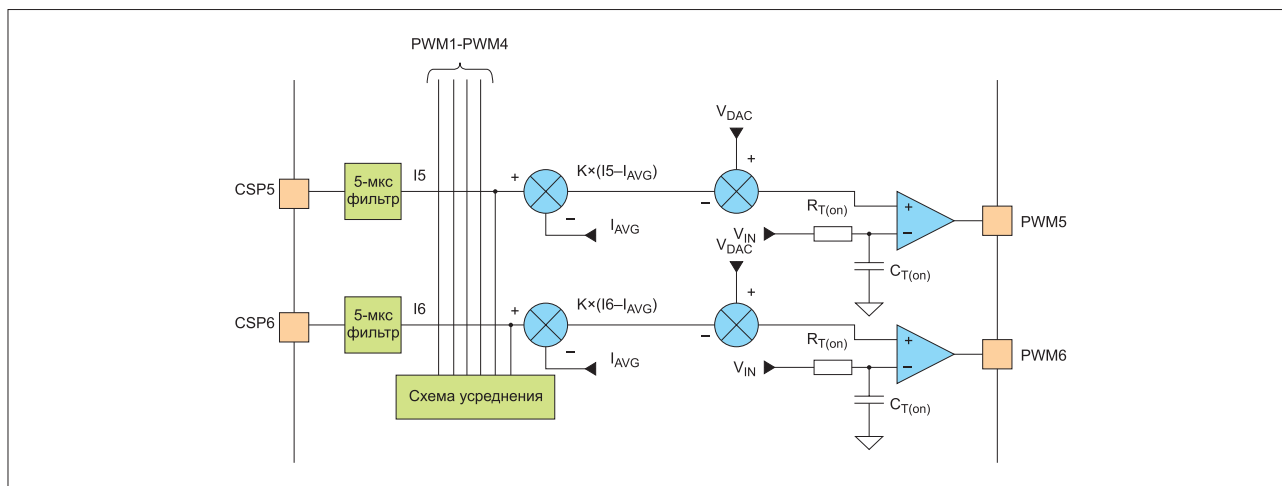


Рис. 5. Схема AutoBalance сравнивает ток в каждой фазе со средней величиной и при необходимости изменяет ширину импульса

который облегчает связь с силовым преобразователем. Работа этого интерфейса основана на SMBus – версии известного протокола I2C. Интерфейс PMBus, используемый во многих одно- и многофазных регуляторах современного поколения, упрощает последовательность выполнения операций, управление выходным напряжением, составление оповещений об условиях эксплуатации и регистрацию неисправностей.

#### Выбор дросселя

При выборе дросселя сначала определяется коммутационная частота. При частоте около 300 Гц коммутационные потери малы, а эффективность высока благодаря относительно медленному переходному процессу. С уменьшением частоты растет величина индуктивности, а ширина полосы цепи управления должна быть уже. И, наоборот, при повышении коммутационной частоты, например до 1 МГц, переходный процесс убыстряется, но увеличиваются коммутационные потери.

При частоте 600 кГц достигается компромисс между высокой эффективностью и быстрым переходным процессом. Если ток пульсации задан на уровне 25%, величина индуктивности в стандартном понижающем преобразователе равна 138 нГн. Ближе всего этому значению соответствует стандартный дроссель с индуктивностью 150 нГн. При той же пульсации и использовании однофазной конфигурации в качестве наихудшего сценария те же уравнения позволяют рассчитать выходную емкость. Ее величина равна 214 мкФ.

#### Силовой каскад

Как уже упоминалось, определение фазного тока представляет собой наибольшую трудность при расчете многофазного преобразователя. Эта задача решается путем использования интеллектуального силового каскада с интегрированным драйвером, силовым MOSFET

и токочувствительной цепью. В паре с совместимым контроллером такое решение обеспечивает более высокую точность, меньшее число компонентов, а также упрощает трассировку сигнальных проводников на печатной плате.

В рассматриваемом случае используется силовой модуль CSD95490Q5MC – оптимизированный каскад для высокомощного синхронного понижающего преобразователя. В это устройство интегрирован силовой MOSFET, выполненный по технологии NexFET 3-го поколения от компании TI. Эта технология позволяет уменьшить паразитные емкости примерно на 50% по сравнению с ранее появившейся технологией TrenchFET при сопоставимой величине  $R_{DS(ON)}$ . При уменьшении емкости уменьшается заряд входного затвора, и быстрее изменяется напряжение в переходном процессе при коммутации, что позволяет повысить рабочую частоту.

В модуль CSD95490Q5MC интегрирована ИС драйвера и силовые ключи с функциями измерения тока и температуры. Это устройство работает при непрерывном токе величиной 75 А. Его коммутационная частота достигает 1,25 МГц, а КПД превышает 90% при токе  $I_{TDC}$  равном 33 А, что с большим запасом отвечает требованиям приложения. CSD95490Q5MC выпускается в небольшом корпусе SON5X6 DualCool с двухсторонним охлаждением.

#### Контроллер

Двухканальный многофазный контроллер TPS53679 хорошо подходит для управления питанием шины ядра ASIC, поскольку он использует модулятор D-CAP+, оптимизированный под многофазное управление и выравнивание фазного тока. Шесть ШИМ-каналов в небольшом корпусе позволяют реализовать большое число силовых каскадов. Интерфейс PMBus удовлетворяет требованиям передачи данных.

В контроллере TPS53679 используется запатентованная схема AutoBalance, которая балансирует фазы, чтобы обеспечить использование равных токов. Эта схема измеряет средний фазный ток и регулирует ширину импульсов разных фаз, выравнивая их токи.

На рисунке 5 показана эта схема. ШИМ-компаратор выдает импульс, когда напряжение обратной связи достигает заданного значения. Напряжение  $V_{IN}$  заряжает конденсатор  $C_{T(on)}$  через резистор  $R_{T(on)}$ . Импульс прекращается, когда напряжение на конденсаторе  $C_{T(on)}$  достигает заданного значения, которое, как правило, равно напряжению на ЦАП ( $V_{DAC}$ ).

Схема работает следующим образом. Если отфильтрованный ток  $I_X$  из каскада X равен средней величине, то выходное напряжение первого суммирующего каскада равно нулю, и  $V_{DAC}$  задает ширину импульса ШИМ. Если  $I_X$  превышает среднее значение тока  $I_{AVG}$ , первый каскад генерирует отрицательное смещение, которое вычитается из  $V_{DAC}$ , уменьшая ширину импульса и, следовательно, фазный ток. И, наоборот, если  $I_X < I_{AVG}$ , генерируется импульс большей ширины, что увеличивает ток каскада X.

#### Выводы

Традиционные однофазные решения перестали отвечать требованиям современных ASIC, DSP и микропроцессоров к характеристикам источников питания. В таких случаях применяющие многофазные понижающие преобразователи, которые имеют несколько преимуществ над стандартными конфигурациями. К числу этих преимуществ относится более высокая эффективность во всем диапазоне изменения параметров, меньшее выходное напряжение пульсаций и лучшая характеристика переходного процесса. Многофазные преобразователи от Texas Instruments отвечают самым строгим требованиям серверных приложений. ◀