ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

ФИЛ ДЭВИС (PHIL DAVIES), корпоративный вице-президент по сбыту, Vicor

Распределенная система питания (PDN) применяется в большинстве электронных устройств. Тенденции развития электроники способствуют увеличению нагрузки на систему электропитания PDN и повышению требований к ее параметрам. Увеличение функциональности и вычислительной мощности устройств привели к росту потребляемого тока, что вызвало повышение потерь электроэнергии в традиционных распределенных системах питания. В статье рассматривается факторизованная архитектура системы питания компании Vicor, позволяющая решить эти проблемы.

Потери мощности можно уменьшить двумя способами.

1. Первый из них заключается в увеличении сечения проводников, слоев шин питания платы и выводов разъема, что увеличивает массогабаритные показатели и, вероятно, стоимость изделия.
2. Второй способ предполагает повышение напряжения на шинах питания; при этом снижается сила тока через шины. Соответственно, уменьшается сечение проводников и размер плат. В этом случае, возможно, сокращается и стоимость решения.

В течение многих лет разработчики больших систем использовали первый способ. Они применяли однофазные AC/DC-преобразователи и 12-В DC/DC-преобразователи. Одной из причин принятия такого решения было отсутствие DC/DC-конверторов, способных эффективно преобразовывать большое по величине напряжение непосредственно в напряжение питания электронных компонентов системы. Применение этого способа заметно повышало стоимость PDN-системы.

Однако возросшие требования вынуждают отказаться от использования первого способа в пользу второго. Например, в центрах обработки данных (ЦОД) внедрение искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронных сетей привело к увеличению потребляемой мощности на 200%. Например, одна стойка может потреблять до 20 кВт. Потребляемая стойками суперкомпьютерного сервера мощность приближается к 100 кВт, а иногда и превышает эту величину.

Подобный рост энергопотребления побуждает разработчиков систем питания пересмотреть методы проектирования. Теперь они вынуждены использовать архитектуру PDN-сети и внутри стойки, и даже на сверхкомпактных серверах (т. н. блейд-серверах). При потреблении менее 5 кВт стойки питались от однофазной сети переменного тока, затем AC/DC-преобразователи формировали шину 12 В, которая распределялась по блейд-серверам. Поскольку суммарный ток 12-В шины достигал 416 А, разводка питания осуществлялась кабелями с проводниками большого сечения.

АДАПТАЦИЯ К ТРЕБОВАНИЯМ НОВЫХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В 2015 г., в связи с увеличением энергоемкости потребителей, стандартную потребляемую мощность стойки увеличили до 12 кВт. Соответственно, ток 12-В шины внутри стойки возрос до 1000 А, что сделало прежние решения непригодными. Сообщество OCP (Open Compute Project), в которое входят многие облачные и серверные компании, предложило изменить конструкцию стойки, заменив кабели шинами и разместив 12-В преобразователи таким образом, чтобы уменьшить расстояние до блейд-серверов и, соответственно, уменьшить длину проводников. Однако главным отличием новой технологии стало питание стоек от трехфазной сети переменного тока, что и позволило увеличить мощность.

Чтобы уменьшить ток шины и мощность, рассеиваемую в сети PDN, компании-производители вместо 12-В шины стали формировать 48-В шины. Увеличение напряжения в 4 раза позволило уменьшить мощность потерь в 16 раз. Суммарный ток 12-кВт стойки уменьшился до 250 А. Однако усложнилась задача по созданию преобразователей для блейд-серверов.

Дальнейшее увеличение потребляемой мощности привело к появлению стоек с энергопотреблением 20 кВт и выше. Были довольно успешные попытки сохранить на стороне потребителей недорогую 12-В экосистему, но после появления процессоров искусственного интеллекта средний ток потребления возрос до 500–1000 А; при этом пиковые токи достигли 2000 А. В этом случае сохранить 12-В шины стало практически невозможно, и консорциум OCP принял решение о переходе PDN-систем на 48-В шины.

ПЕРЕХОД НА 48-В СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Еще раз напомним, что увеличение напряжения в четыре раза позволило уменьшить потребляемый ток во столько же раз ($P = VI$), а потери в распределительной системе – в 16 раз ($P_{ПОТЕРЬ} = I^2R$). 48-В система начала быстро распространяться в результате перехода приложений автомобильной электроники, 5G, светодиодного освещения, а также промышленного оборудования на архитектуру PDN с 48-В шиной. Переход на напряжение 48 В обусловлен ясными экономическими причинами. Он позволяет разработчикам по своему выбору использовать либо 12-, либо 48-В шины в зависимости от мощности потребителей. Однако не следует забывать, что топологии и принципы построения 48-В преобразователей могут сильно отличаться друг от друга, и их эффективность следует учитывать в каждом конкретном случае.

Для питания мощных высокопроизводительных стоек многие компании используют трехфазную сеть переменного тока с прямым преобразованием в напряжение постоянного тока 48 В, предназначенным для дальнейшего распределения. Другим вариантом является выпрямление напряжения трехфазной сети переменного тока с подачей в стойку напряжения 380 В по принципу электропередачи постоянного тока (HVDC). Для высокопроизводительных вычислительных систем (HPC) в стойках мощностью до 100 кВт обычно используется электропередача HVDC.

Перевод распределительной сети на 48 В требует изменений в схемах преобразования напряжения в более низкое в блейд-серверах. Это весьма интересный процесс, т. к. существуют многочисленные альтернативные подходы к архитектуре, топологии и форм-факторам преобразователей.

ЗНАЧИМОСТЬ АРХИТЕКТУРЫ И ТОПОЛОГИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИСТЕМ HPC

Если для серверов ЦОД использование 48-В архитектуры внове, то в связной аппаратуре электропитание, например, маршрутизаторов или сетевых коммутаторов давно осуществляется от источников с таким напряжением, поскольку в резервируемых установках питания используются свинцово-кислотные аккумуляторы с номинальным напряжением 48 В.

В телекоме эта архитектура получила название архитектуры с промежуточной шиной (IBA). Она состояла из нерегулируемого шинного преобразователя –48/12 В с гальванической развязкой, генерирующего напряжение 12-В шины. К этой шине подключаются многофазные понижающие преобразователи, формирующие напряжение питания потребителей. Некоторые компании, занимающиеся облачными и высокопроизводительными вычислениями, скопировали эту архитектуру для своих 48-В систем, но по мере увеличения потребляемой мощности и снижения напряжения питания в точках потребления энергии до 1 В и ниже им пришлось искать альтернативные архитектурные решения и топологию.

Архитектура системы электропитания, топология коммутации и конструктивное оформление чрезвычайно важны для разработок с высокой плотностью и производительностью, обеспечивающих рост вычислительной мощности. Увеличение силы тока, потребляемого процессорами и системами искусственного интеллекта, привело к тому, что одним из наиболее важных параметров системы питания стали размеры сети электропитания, влияющие на сопротивление цепи PDN между преобразователями и потребителями.

ПРАВИЛА ИГРЫ МЕНЯЮТСЯ

Итак, новейшие процессоры для приложений ИИ потребляют в статическом режиме до 1000 А, а пиковое потребление достигает 1500–2000 А. Типовое сопротивление шины PDN от конечной ступени преобразования до потребителя составляет 200–400 мкОм. Нетрудно подсчитать, что на этом сопротивлении постоянно рассеивается мощность 200–400 Вт ($P = I^2R$), что, конечно, неприемлемо для любой системы. Потери в PDN становятся доминирующим фактором при расчете КПД и производительности системы DC/DC-преобразования.

К сожалению, невозможно использовать, казалось бы, очевидное решение увеличить выходное напряжение PoL-преобразователей. Дело в том, что по закону Мура напряжение питания микросхем постоянно уменьшается, поэтому единственная возможность заключается в снижении сопротивления PDN. Следовательно, регуляторы необходимо устанавливать в непосредственной близости от процессора. При использовании многофазных регуляторов может потребоваться от 16 до 24 фаз для обеспечения большой силы тока, необходимой для процессоров, которые применяются в системах ИИ. При этом удельная мощность снижается, так что задача уменьшения потерь в PDN-системе остается нерешенной.

ФАКТОРИЗОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Альтернативой архитектуре IBA служит факторизованная архитектура (Factorized Power Architecture, FPA), разработанная компанией Vicor. Она состоит из каскада предварительного регулирования (pre-regulation module, PRM) и следующего за ним каскада преобразования напряжения (voltage-transformation module, VTM).

Подобная специфическая архитектура FPA позволяет оптимизировать параметры каждого каскада. При этом преобразователь PRM регулирует и стабилизирует напряжение без гальванической развязки (поскольку 48 В является безопасной величиной напряжения), оставляя функцию понижения напряжения до величины, желаемой для питания потребителей, модулю VTM с фиксированным коэффициентом преобразования K.

Рабочие характеристики этого решения значительно улучшены благодаря использованию в модулях PRM и VTM топологических решений, специально разработанных фирмой Vicor. PRM-преобразователь использует коммутацию силовых каскадов при переходе напряжения через нулевое значение. Модуль VTM, обеспечивающий преобразование напряжения до величины, необходимой для конечного потребителя, базируется на фирменной топологии т. н. резонансного высокочастотного преобразователя амплитуд синусоидальных колебаний (Sine Amplitude Converter, SAC), в котором переключение происходит при нулевых значениях тока и напряжения. Модуль VTM можно рассматривать как понижающий в K раз трансформатор постоянного тока с коэффициентом трансформации 1/K. Соответственно, в K раз увеличивается выходной ток модуля. По этой причине модуль VTM иногда называют умножителем тока. Такой PoL-преобразователь с высокой плотностью тока (величина которой в новейших изделиях достигает 2 А/мм^2) благодаря технологии компоновки модуля и высокой степени интеграции магнитных моточных компонентов можно устанавливать в непосредственной близости от процессора.

Высокая плотность тока предоставляет проектировщику значительную свободу действий. В зависимости от тока потребления можно выбрать горизонтальный или вертикальный вариант подачи электроэнергии к процессору. При горизонтальной топологии (Lateral Power Delivery, LPD) модуль VTM располагается в непосредственной близости от процессора ИИ либо на той же подложке, либо на материнской плате на очень малом (не более нескольких мм) удалении от него, что позволяет уменьшить сопротивление PDN примерно до 50 мкОм.

Для повышения эффективности применяется вертикальный метод подачи электропитания (Vertical Power Delivery, VPD), в котором умножитель тока VTM устанавливается непосредственно под процессором. При этом расположение выводов преобразователя соответствуют расположению входов электропитания процессора над ним. В корпус такого модуля интегрированы помехоподавляющие высокочастотные конденсаторы большой суммарной емкости, которые обычно располагаются под процессором на материнской плате или подложке. Такой тип модуля получил название GCM (Geared Current Multiplier). Вертикальная топология сокращает длину проводников шин питания до минимума, при котором их сопротивление снижается до 5–7 мкОм. Столь низкое значение сопротивления обеспечивает процессор максимальным током, благодаря чему удается полностью реализовать его вычислительные возможности.

Чрезвычайная сложность задачи разработки системы электропитания с подобными параметрами требует комплексного

подхода к ее решению для достижения высоких показателей. Для выполнения постоянно ужесточающихся требований и решения усложняющихся системных проблем требуются инновационные подходы, позволяющие улучшить архитектуру системы распределенного питания, топологию модулей этой системы, а также конструктивное исполнение этих модулей. Увеличение входного напряжения PoL-преобразователей упрощает проектирование систем, но без повышения удельной мощности и КПД оптимальное решение получить невозможно. Только снижение сопротивления подводящих проводников PDN позволяет выйти на новые горизонты в области высокопроизводительных вычислительных устройств и систем искусственного интеллекта

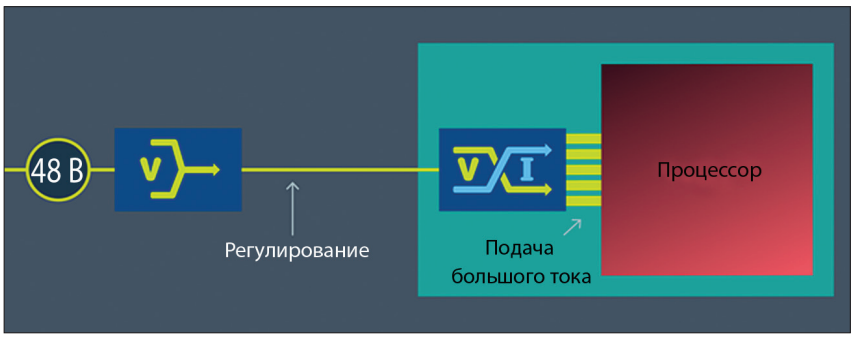

Рис. 1. **Общий принцип построения факторизованной архитектуры**

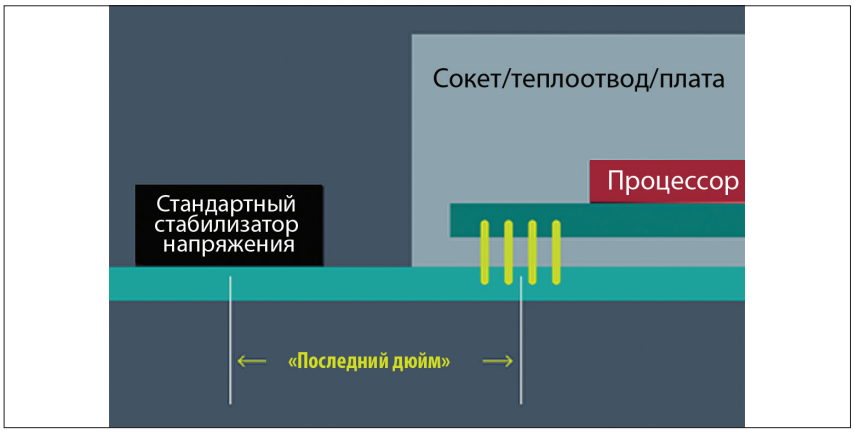

Рис. 2. **Традиционное решение PDN-схемы**

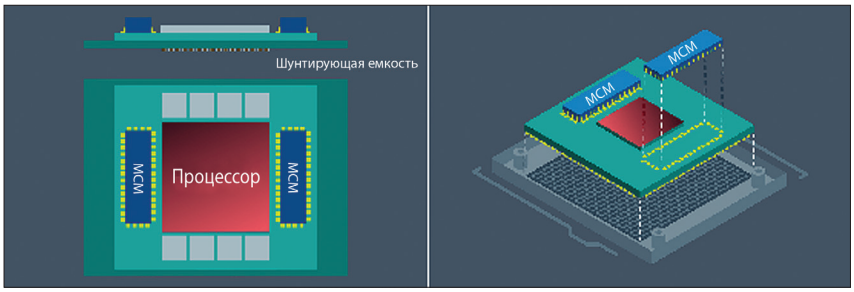

Рис. 3. **Факторизованная архитектура, горизонтальный вариант построения (LPD)**

ИДЕАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОНЕЧНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Для построения оптимальной системы электропитания конечной нагрузки (см. рис. 1) следует учесть, что:

1) регулирующий каскад обладает наивысшим КПД, когда $V_{вх} = V_{вых}$;
2) общий КПД системы максимален при минимальном расстоянии, на которое передается большой ток, потребляемый конечной нагрузкой, т. е. потери в проводниках минимизированы.

«ПОСЛЕДНИЙ ДЮЙМ»

Решая проблемы, создаваемые высокими токами потребления современных процессоров большой мощности на участке т. н. «последнего дюйма» (см. рис. 2), технология Vicor не просто повышает эффективность системы и упрощает конструкцию материнской платы, но и обеспечивает процессорам качественно новые, недостижимые прежде вычислительные возможности, необходимые для современных приложений (например, систем искусственного интеллекта).

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Подводка токов большой величины осуществляется модулями MCM, которые могут располагаться в непосредственной близости от процессора и на материнской плате, и непосредственно на подложке (см. рис. 3). Последний вариант снижает потери в PDN-съеме и позволяет уменьшить количество шариковых выводов в массиве (BGA), занятых на подложке под электропитание.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Вертикальная топология (VPD) в еще большей мере снижает потери в подводящих проводниках и уменьшает площади, занимаемые на печатной плате системой электропитания (см. рис. 4). Она отличается от горизонтального построения интеграцией интерфейсных емкостей с умножителем тока (модуль GCM).

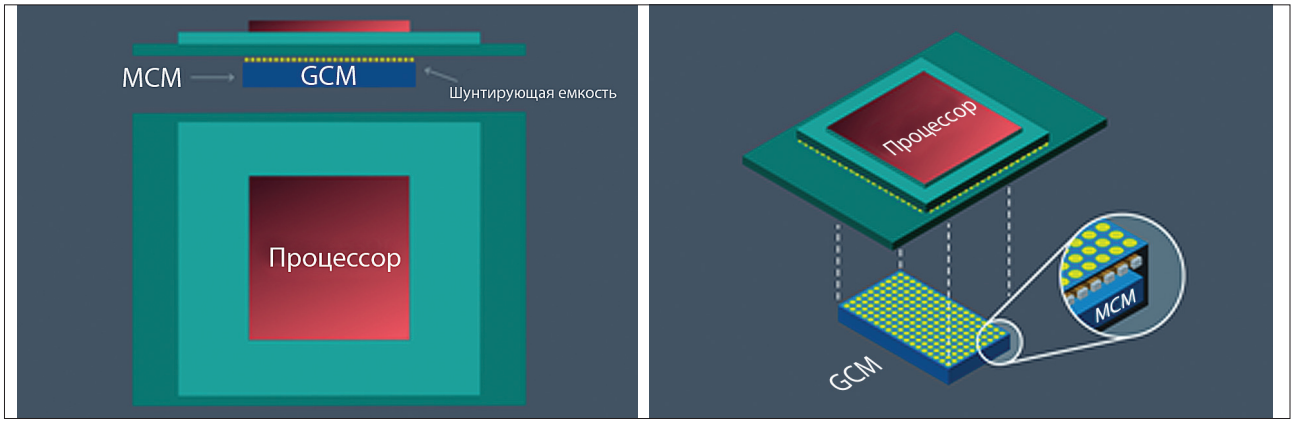

Рис. 4. **Факторизованная архитектура: вариант построения с вертикальным расположением преобразователя (VPD)**