

Параллельное соединение однотипных модулей электропитания для резервирования с активным принудительным распределением тока нагрузки

Виктор Жданкин (info@prochip.ru)

В статье кратко рассмотрены основные проблемы, возникающие при параллельном соединении модулей электропитания для увеличения мощности и резервирования в современных распределённых системах электропитания для сложных радиотехнических, компьютеризированных и телекоммуникационных комплексов. Рассмотрен метод равномерного распределения тока нагрузки и синхронизации высокой частоты преобразования включённых параллельно однотипных модулей DC/DC-преобразователей напряжения Brick (2-го поколения) компании Wibbow с применением двунаправленного цифрового интерфейса между модулями, обеспечивающий несложное надёжное параллельное соединение для повышения выходной мощности и резервирования.

Специалисты по преобразовательной технике, проектирующие системы электропитания, могут подтвердить, что разработка является нетривиальной задачей, пронизанной тонкостями, которые могут проявлять себя в трудно диагностируемых системных особенностях. Удачный пример, относящийся к данному вопросу: многие системы электропитания заявляют о своей высокой надёжности, но тщательный анализ выявляет случаи отказа системы вследствие часто игнорируемых отказов одного её элемента.

Высокая надёжность требует, чтобы в случае отказа одного элемента система электропитания была способна обеспечить заданное значение выходной мощности или работающая система была способна снижать требования к полной мощности. В высоконадёжных системах электропитания обычно используется резервирование, опирающееся на дополнительные источники питания в системе электропитания сверх тех, которые требуются для питания нагрузки. При аварийном режиме эти дополнительные источники питания могут восполнить недостаток неисправных модулей, таким образом значительно повысив надёжность системы и минимизировав или даже устранив время простоя. Так как резервированные системы электропи-

тания фактически имеют большую стоимость, их использование обычно ограничивается применениями, требующими высокой эксплуатационной готовности системы, такими как высокопроизводительные компьютеры обработки транзакций, локальные и глобальные сети, телекоммуникационное оборудование.

Стоимость, как правило, ограничивает использование резервированных систем электропитания несмотря на то, что ранее развивавшаяся тенденция к понижению стоимости одного ватта мощности закрыла разрыв между действительной стоимостью и желательной стоимостью реализации системы. Действительная стоимость определяется здесь как материальная стоимость технических средств, необходимых для создания требуемой системы электропитания без учёта возможных издержек, понесённых вследствие отказа системы. Определение точной стоимости является не очень простым делом, так как оно должно учитывать сложные для оценки показатели, такие как упущенные возможности и вероятные правовые последствия. Действительная стоимость уменьшается, в то время как оценочная стоимость этих дополнительных факторов возрастает. Аналогично реальная стоимость снижается,

так как снижается материальная стоимость силовых компонентов, которые должны быть использованы в системе. Поэтому, прежде чем определять, требуется или нет резервированная система питания, необходимо учитывать влияние отказа системы. Важным фактором является то, что поскольку зависимость общества от технических средств возрастает, приемлемые затраты на реализацию резервированной системы питания будут возрастать, так как время вынужденного простоя системы будет становиться менее допустимым и более дорогостоящим для пользователей системы.

В компоновке резервированных систем электропитания должны быть приняты компромиссные решения, которые непосредственно влияют на стоимость, сложность системы и её работоспособность. Формула $(N+M)$ используется для определения уровня резервирования, где N – это количество источников питания, требуемых для обеспечения заданного значения выходной мощности для питания нагрузки, а M – количество дополнительных резервных источников питания, применяемых для повышения надёжности. Очевидно, что, поскольку M резервных модулей питания повышают надёжность системы, стоимость системы также увеличивается. Например, возьмём компоновку, где к нагрузке подключены два преобразователя напряжения Модуль 1 и Модуль 2. В этом случае $N = 1$ и $M = 1$, означая, что один преобразователь требуется для обеспечения заданного значения мощности нагрузки, а другой дополнительный преобразователь является резервным и используется для повышения надёжности системы. Рассмотрим несколько проблем, связанных с этой компоновкой. Главное, несмотря на то что система резервированная, здесь нет обязательного сохра-

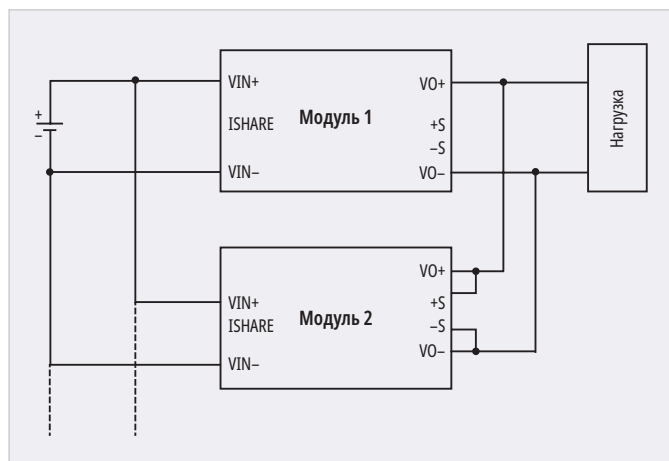


Рис. 1. Блок-схема системы электропитания с параллельным соединением модулей преобразователей напряжения без механизма распределения тока нагрузки

нения работоспособности при отказе отдельных элементов модуля. Например, в том случае, когда видом отказа является закороченный выходной конденсатор, допустим, в Модуле 1, выход Модуля 2 также будет закорочен, если модули работают параллельно (рис. 1). Этот недостаток можно исправить включением блокирующих диодов по схеме «ИЛИ» последовательно с каждым выводом положительного напряжения, таким образом разделяя выходы друг от друга в случае короткого замыкания выхода (рис. 2).

Режим перенапряжения

Дистанционное измерение напряжения на нагрузке (или отслеживание тока нагрузки и формирования управляющего сигнала для источника опорного напряжения) позволяют преобразователю контролировать и регулировать выходное напряжение непосредственно на нагрузке (выводы внешней обратной связи +S и -S подключены непосредственно к зажимам нагрузки, рис. 2). В некоторых системах, где существует чрезмерное падение напряжения на соединительных проводах, дистанционное измерение компенсирует эти потери, позволяя формировать в результате стабилизированное напряжение на нагрузке. Но когда напряжение на выходе преобразователя повышается для компенсации потерь напряжения на токоведущих проводах, необходимо соблюдать осторожность для гарантирования, что выходное напряжение не достигнет условия перенапряжения, которое во многих устройствах приведёт к блокировке преобразова-

теля. Снабжение электропитанием в таком случае может быть восстановлено повторным включением преобразователя – в результате возникает простой системы.

При параллельном соединении с развязывающими диодами почти всегда в этом случае должно быть использовано дистанционное измерение напряжения на нагрузке для компенсации падения напряжения на диодах. Альтернативой является подстройка выходного напряжения модулей для компенсации падения напряжения на диоде. Но у обычного преобразователя с 5-вольтовым выходом допустимая величина компенсации дистанционного измерения равна 10% или 0,5 В. И при приблизительной величине падения напряжения на блокирующем диоде 0,4 В это допущение оставляет небольшой запас для любых дополнительных потерь напряжения на соединительных проводах. Для преобразователей с выходными напряжениями 3,3 В и 2 В проблема становится ещё более острой: может потребоваться смещение уставки выше номинала (например, до 3,7 В и 2,4 В), а также переход от дистанционного к локальному измерению напряжения [1]. В этой ситуации блокирующие диоды должны быть подобраны по соизмеримым значениям прямых падений напряжений. Эта проблема может быть решена применением в качестве защитных элементов МОП-транзисторов с небольшим сопротивлением сток-исток в открытом состоянии и падением напряжения на транзисторе несколько десятков мВ, но в этом случае потребуются приме-

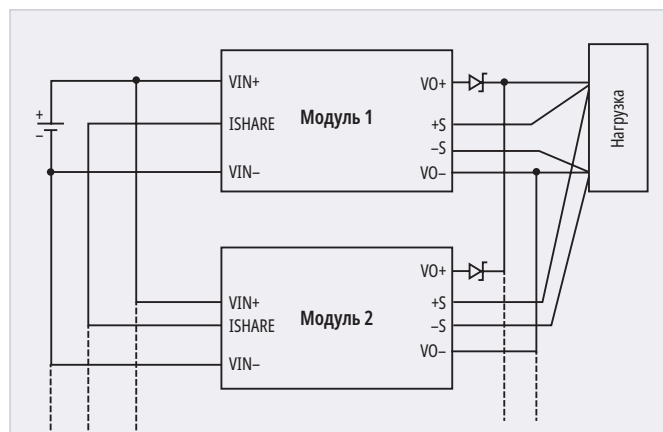


Рис. 2. Блок-схема системы электропитания с параллельным включением модулей питания, равномерным распределением мощности нагрузки с защитными диодами (по схеме «ИЛИ») от короткого замыкания по выходу и дистанционным измерением напряжения на выводах нагрузки

нение дополнительной схемы управления МОП-транзисторами [2], [3].

Кроме того, преобразователи не могут гарантировать равномерное распределение токов, так как обратная связь регулирования выходного напряжения с высоким петлевым усилением вызывает дисбалансы выходных токов. Это означает, что Модуль 1 может быть нагружен на 100%-ную нагрузку, в то время как Модуль 2 будет находиться в режиме холостого хода. Эта компоновка имеет несколько негативных последствий. Первое, в том случае, когда Модуль 1 обеспечивает полную нагрузку, он также рассеивает всю тепловую энергию. Это приведёт к значительно меньшему значению среднего времени наработки до отказа для Модуля 1, чем для случая, когда ток был бы распределён между преобразователями в равной степени. Второе, в случае выхода из строя Модуля 1 Модуль 2 должен переключиться фактически из режима холостого хода в режим работы при полной нагрузке. Это скачкообразное изменение нагрузки, вероятно, приведёт к резкому падению напряжения на выходе Модуля 2, так как его внутренний выходной конденсатор в начальной стадии лишится всей своей накопленной энергии, в то время пока модуль пытается достичь своего заново установленного рабочего режима.

Это резкое понижение выходного напряжения может привести к нарушению работы функциональных частей питаемой аппаратуры, вызвав системный сбой, перезагрузку, защёлкивание и даже выключение. Если бы в начальной стадии нагрузка между



Рис. 3. Внешний вид модулей семейства Brick 2-го поколения с выводом «PR» двунаправленного цифрового порта для синхронизации частоты преобразования и равномерного распределения мощности нагрузки между отдельными однотипными модулями при параллельном включении

модулями была распределена поровну, Модуль 2 был бы значительно ближе к рабочему режиму в его новых условиях полной нагрузки, и кратковременное падение напряжения было бы менее жёстким, зачастую – незначительным.

В этом случае однопроводное соединение с равномерным распределением токов, установленное между двумя или более преобразователями, вынуждает их обеспечивать равные доли мощности нагрузки.

Распределение тока – важный аспект надёжности системы и резервирования

Распределение тока является весьма важным аспектом надёжности системы и резервирования. Существует широкий спектр подходов к обеспечению равномерного распределения тока: от пассивных методов, основанных на введении балансирующих резисторов или формировании регулируемого падающего участка выходной характеристики преобразователя, что позволяет компенсировать технологические разбросы, до активных решений, реализующих принцип «включай и работай» [4]. В одном методе активного распределения токов модули взаимодействуют между собой для форсирования распределения тока (метод разделения тока последовательным опросом). Этот механизм может произвести впечатление универсального средства для системотехников, ищущих достоверное решение; эта схема представляется такой, что многие разработчики считают, что она может быть стойкой к отказам. Однако во множестве раз

проверенных элементах схемы один необнаруженный вид отказа может отключить всю систему.

Но что, если что-нибудь пойдёт неправильно с выбранным каналом распределения тока преобразователя, например, если внутренняя схема распределения тока выйдет из строя, замкнётся на землю или любой другой потенциал, отличный от того, который гарантированно обеспечивает одинаковое распределение токов? Это разрушит всю шину распределения тока (I share) и приведёт к отказу системы. А что, если действующие линии, которые соединяют выводы управления распределением мощности нагрузки (I share) преобразователей, каким-нибудь образом выйдут из строя, возможен ли разрыв цепи или непреднамеренное замыкание с другой линией или компонентом?

Если вероятность возникновения некоторых из этих механизмов отказа высокая, выше других, фактом является то, что это внутренний неотъемлемый недостаток схемы. Слабым звеном являются выводы распределения тока нагрузки (I share), не изолированные друг от друга, которые в большинстве случаев просто не могут быть изолированными. То есть, поскольку многие преобразователи используют аналоговые сигналы распределения токов, их выводы распределения токов (I share) должны быть соединены непосредственно друг с другом. Кроме того, эти аналоговые сигналы имеют ограниченную помехозащищённость. Усиление и защита этой части системы электропитания применением специально разработанного преобразователя или серийного пре-

образователя, имеющего соответствующее схемное решение, будет обеспечивать действительную стойкость к отказам или повышенную надёжность.

Параллельная работа

Для совершенствования архитектуры системы электропитания в модулях DC/DC-преобразователей второго поколения Brick компании Wibbow (рис. 3) применяется оригинальный цифровой сигнал распределения тока, который способствует параллельной работе преобразователей для увеличения мощности и резервирования. Вывод «PR» является двунаправленным портом, который отправляет и получает информацию между модулями. Импульсный сигнал в параллельной шине служит для синхронизации высокой частоты переключения каждого модуля, который, в свою очередь, заставляет их равномерно (с точностью до 5%) распределять ток нагрузки между модулями. Эти модули обладают способностью распределять роль управления, то есть имеет место демократический массив (принудительное распределение тока в определённом порядке). В системе имеется один модуль, передающий синхронизирующие импульсы по параллельной шине, в то время как другие модули на шине принимают сигнал – находятся в режиме прослушивания. Далее в статье рассмотрена структура шины интерфейса PR с трансформаторной развязкой и пример реализации системы электропитания мощностью несколько кВт с принудительным распределением тока нагрузки, обеспечивающей достаточно высокую точность разделения тока.

Соединения шины распределения мощности нагрузки

Связанный по переменному току однопроводной интерфейс

Все выводы PR подключаются к единой коммуникационной шине через конденсатор ёмкостью 0,001 мкФ (500 В). Отрицательные выводы входного напряжения –IN должны быть подключены к одинаковому электрическому потенциалу. Это соединение обеспечивает равномерное распределение тока нагрузки и является стойким к отказам, за исключением канала связи (рис. 4). С применением этого

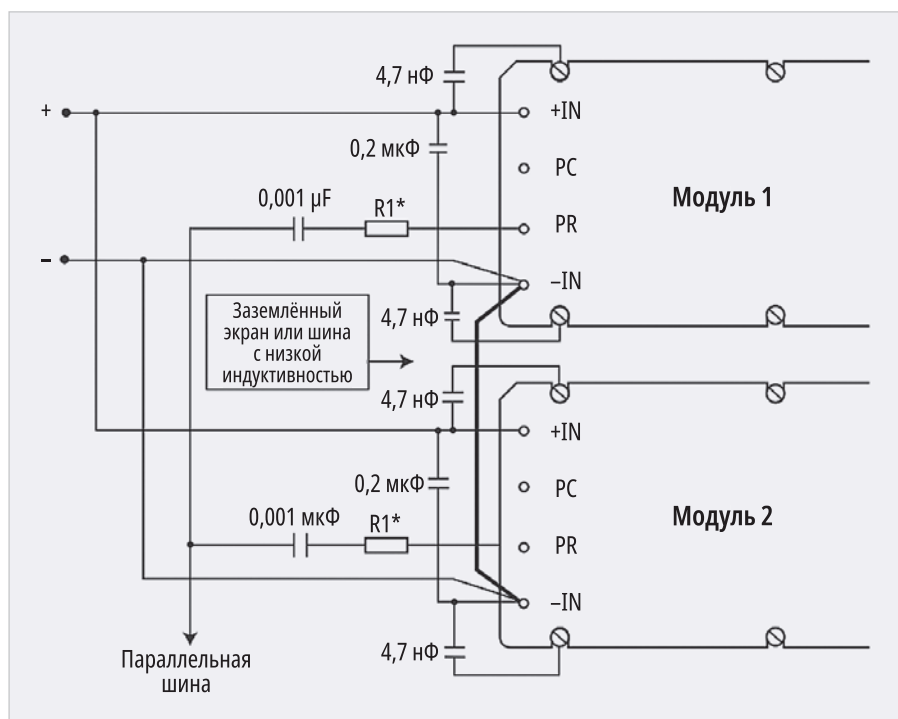


Рис. 4. Однопроводной интерфейс по переменному току, организованный через порт PR-модулей Brick (2-го поколения)

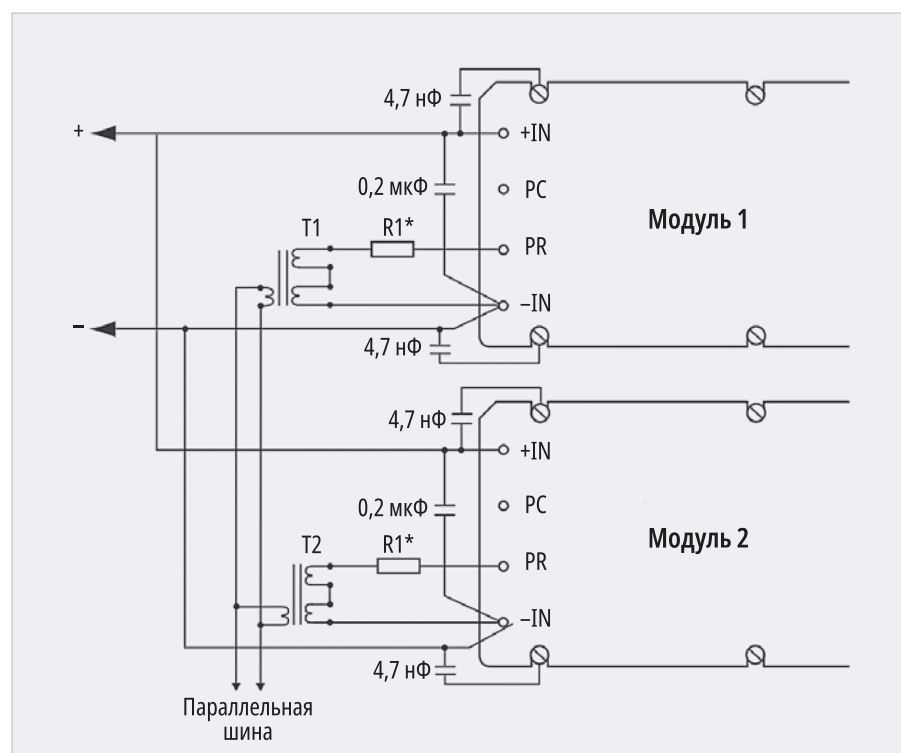


Рис. 5. Двухнаправленный интерфейс между выводами PR с гальванической развязкой, обеспечиваемый трансформатором

метода могут быть соединены параллельно до шести модулей.

Интерфейс с трансформаторной связью

Модули или массивы модулей могут также быть соединены для распределения мощности нагрузки с обеспечением гальванической развязки между

выводами PR посредством интерфейса с трансформаторной связью (рис. 5). Этот метод позволяет включить параллельно четыре и более преобразователя (до 12) без буферизации шины.

Для больших массивов преобразователей или длинных сигнальных линий (> 30 см) может потребоваться использование буферной схемы.

Источник напряжения для буферной схемы может быть получен от выводов РС (управление включением/выключением с первичной стороны). Во многих применениях будет полезно подключить последовательно с выводом PR каждого модуля дополнительный резистор (формирующий дополнительный импеданс Z1 на входе). Для улучшения формы сигнала PR может быть использовано ферритовое кольцо с низкой добротностью 33 Ом, 100 МГц или резистор сопротивлением 5...15 Ом.

Рекомендации по параллельному соединению

Внимание должно быть уделено исключению влияния мешающих сигналов (шумов) на параллельную шину, так как они могут препятствовать правильному распределению мощности между модулями. Одними из возможных источников помехи являются пульсации входного тока, протекающие через входные выводы подводимой мощности. Входы сигнала PR и питания совместно используют общий обратный провод, которым является вывод отрицательного напряжения. Для устранения пульсаций входного тока на параллельной шине требуется принимать специальные меры. Для шунтирования пульсаций входного тока на входе каждого модуля между выводами +IN и -IN устанавливаются керамические конденсаторы ёмкостью 0,2 мкФ (рис. 5). Они обеспечивают шунтирующую пульсации входного тока цепь и существенно его уменьшают. Для снижения синфазной составляющей тока применяются конденсаторы C_V ёмкостью 4,7 нФ, которые устанавливаются между выводами +IN и основанием модуля и между выводами -IN и основанием каждого модуля, таким образом образуя шунтирующую цепь для синфазной составляющей пульсаций входного тока.

Некоторые применения требуют физического разделения параллельно включённых модулей на разных платах и/или входной мощности от отдельных источников энергии. В этих случаях требуется трансформаторная связь сигнала PR для предотвращения межмодульного отражения сигнала в виде синфазной помехи от взаимодействия с передачей синхронизирующего импульса. Высокоскоростная буферизация может потребоваться

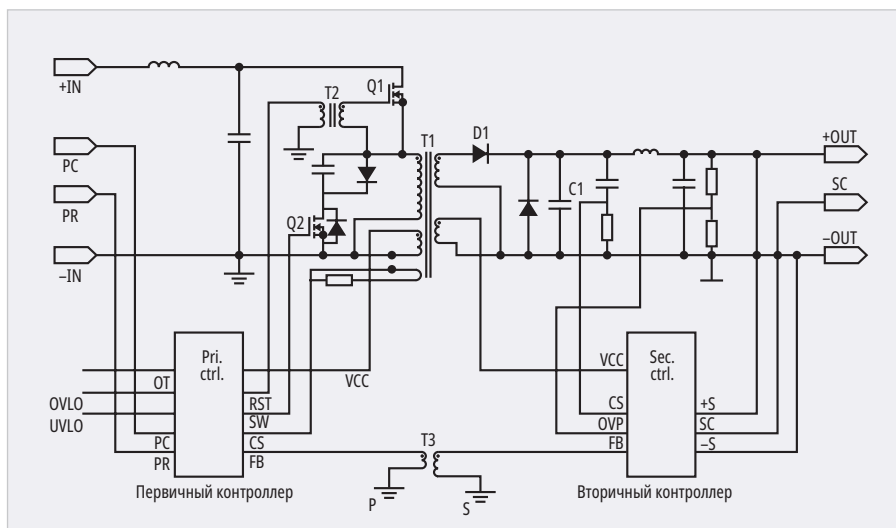


Рис. 6. Упрощённая принципиальная схема DC/DC-преобразователей Brick 2-го поколения с перечнем защитных функций

для больших массивов преобразователей или в том случае, когда расстояние между модулями больше, чем 30 см. Это необходимо вследствие того обстоятельства, что все модули, за исключением одного, передающего данные, находятся в режиме прослушивания. Каждый приёмник в канале связи представляет собой нагрузку для источника сообщений, равную примерно 500 Ом и зашунтированную ёмкостью 30 пФ. Длинные соединительные провода вносят потери и создают паразитное реактивное сопротивление на шине, которое может ослабить и исказить синхроимпульс. Для стабильности работы ширина полосы пропускания шины должна быть по крайней мере 60 МГц, а ослабление сигнала менее 2 дБ. В большинстве случаев достаточно применения трансформаторной связи без буферизации.

Создание массивов высокой мощности с использованием DC/DC-преобразователей напряжения семейства Brick (2-го поколения)

Как отмечалось ранее, преобразователи серии Brick 2-го поколения имеют функцию параллельной работы нескольких модулей на общую нагрузку. Уникальный интерфейс для организации параллельной работы позволяет создавать системы мощностью несколько киловатт с применением нескольких внешних компонентов. Для соединения в массивы с мощностью несколько киловатт более чем 12 однотипных модулей требуется буферизация сигнала PR, так как

достигается предел нагрузочной способности по выходу канала связи. Далее будет показано, как использовать буферизацию, чтобы увеличить способность канала управлять большим числом преобразователей, и приводится пример, каким образом быстро создать макет системы мощностью несколько киловатт. Это даёт семейству Brick эффективность функционирования при использовании для создания систем электропитания с выходной мощностью в диапазоне нескольких киловатт.

Структура шины PR

Конфигурации верхний уровень / нижний (ведомый) уровень

Первое, что должно быть выполнено при разработке больших массивов, – определение количества модулей верхнего уровня. Большие количества модулей верхнего уровня усилят резервирование, но усложнят организацию шин PR и дистанционного измерения напряжения на нагрузке (+S/-S). Выглядит заманчивым сконфигурировать все модули в демократический массив, когда каждый модуль оказывает равное влияние на результирующее напряжение шины, но это может оказаться громоздким для массивов с числом модулей более трёх. Для больших массивов лучшим вариантом является установка до трёх модулей в качестве модулей верхнего уровня и добавление дополнительного управляемого модуля для большей мощности. Это обеспечивает достаточное резервирование для большей части применений. На рис. 6 показана

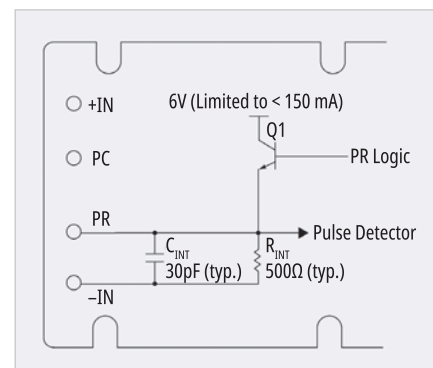


Рис. 7. Эквивалентная схема вывода PR

на весьма упрощённой принципиальной схеме преобразователя постоянного напряжения семейства Brick (второго поколения), выполненная по квазирезонансной схеме прямоходового преобразователя с управлением преобразованием методом частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и перечнем основных защитных и сервисных функций. Переключение силового транзистора Q1 из закрытого состояния в открытое происходит при нулевом значении протекающего через него тока (режим «мягкой» коммутации). Резонансный контур образован индуктивностью рассеяния трансформатора T1 и дополнительной ёмкостью C1. Отрицательная волна синусоиды отсекается диодом D1. Таким образом, на конденсаторе C1 формируются импульсы положительной полярности одинаковой длительности и амплитуды – «кванты» энергии величиной $CV^2/2$. Регулирование выходного напряжения осуществляется путём изменения числа «квантов» (частоты их следования), а не длительности импульсов, как в схеме с широтно-импульсной модуляцией. Частота импульсов зависит от мощности в нагрузке, величины входного напряжения и может изменяться от сотни кГц на холостом ходу до 1,5 МГц при минимальном входном напряжении и максимальной мощности в нагрузке.

Схемы управления (контроллеры на первичной и вторичной сторонах) выполнены в виде специализированных интегральных микросхем. Схема активного демпфирования – узел на транзисторе Q2 – формирует напряжение, величина которого может приближаться к значению входного напряжения, и, таким образом, переключение транзистора происходит при нулевом напряжении сток-исток. В результате КПД преоб-

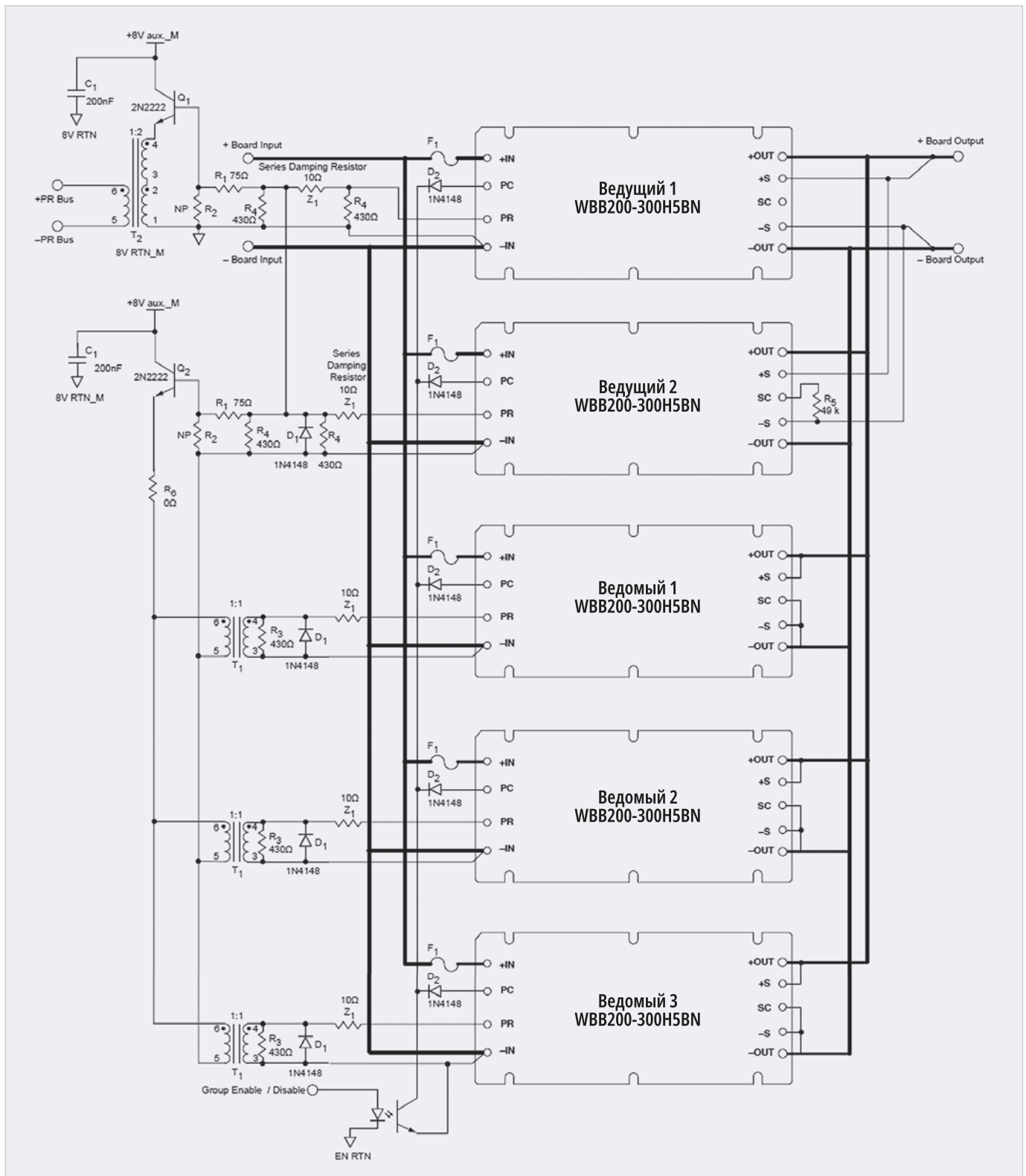


Рис. 8. Макетная плата массива модулей верхнего уровня, одна плата в системе

разователей возрастает на несколько процентов (до 92,5% макс.).

Благодаря использованию резонансной схемы с ЧИМ удалось значительно уменьшить размеры модулей и достичь высокого значения удельной мощности. Ещё одним достоинством резонансной схемы является существенное снижение уровня шумов и помех.

Преобразователи соответствуют требованиям к модулям для применения в высоконадёжных системах вторичного электропитания:

- управление включением и отключением внешним сигналом;
- взаимная синхронизация;
- подключение цепи внешней обратной связи;

- регулировка выходного напряжения (в пределах 75...110% от номинального);
- контроль сигнала технического состояния внешними узлами;
- параллельная работа в системе «N+1» при N = 12;
- наличие гальванической развязки и обеспечение стандартного значения прочности электрической изоляции;

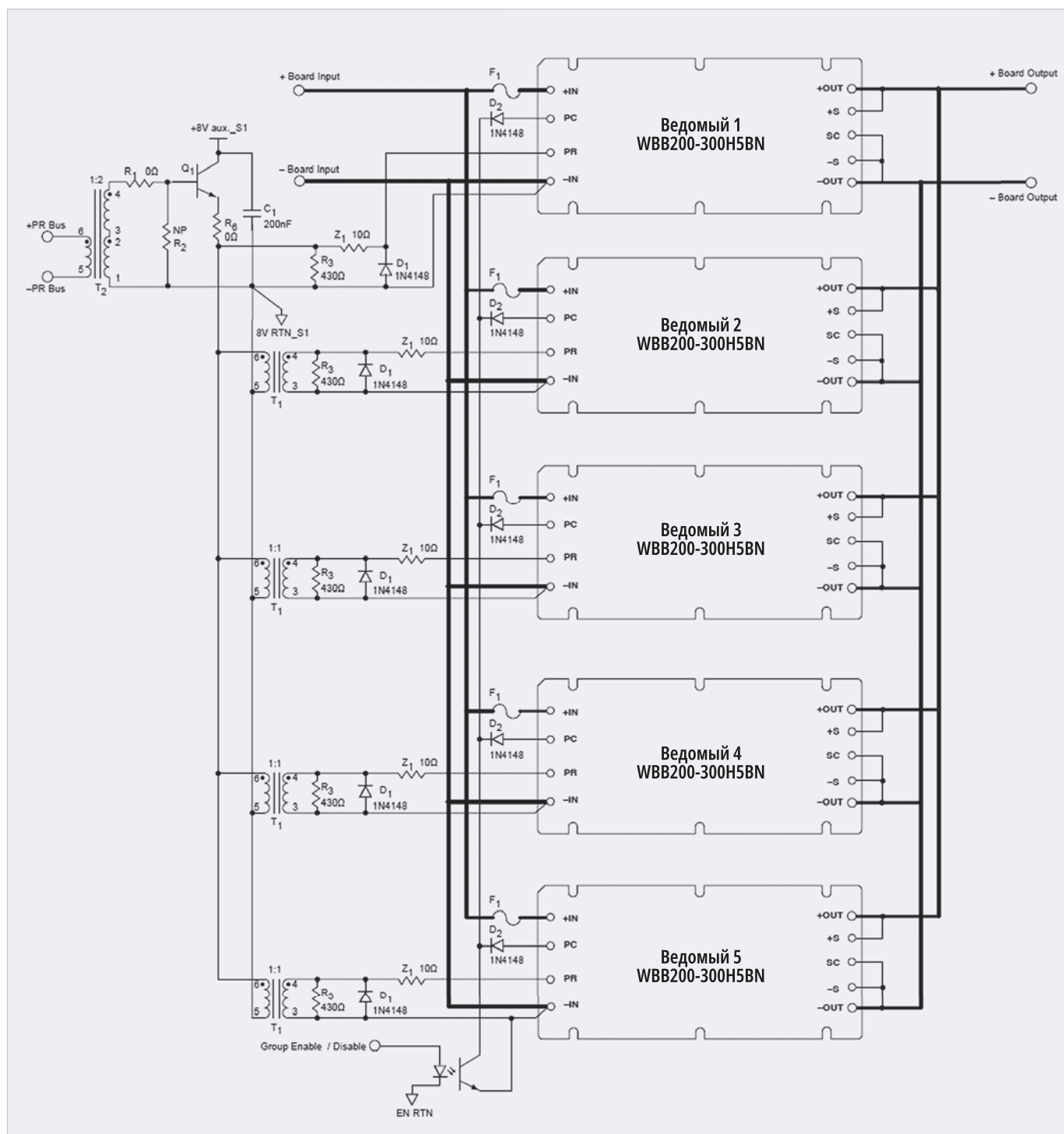


Рис. 9. Макетная плата массива модулей преобразователей второго уровня (четыре платы в системе)

● комплект защит (от перегрева, от перенапряжения на входе, от низкого напряжения на входе, перенапряжения на выходе, перегрузки и короткого замыкания на выходе).

При соединении вывода SC (контроллер выхода) с выводом -OUT внутренняя схема управления отключается, и модуль переходит в режим повторителя напряжения (усилитель тока) с управлением по выводу PR от задающего модуля (управляющего модуля верхнего уровня). При этом осуществляется синхронизация рабочей

частоты всех модулей системы и, как следствие, равномерное (с точностью 2...5%) распределение мощности между модулями. В системе электропитания применяются однотипные модули, не требуется использования более сложного ведущего преобразователя, что упрощает формирование склада запасных модулей.

Следует заметить, что модули серии Brick 2-го поколения компании Wibbow являются полными функциональными аналогами популярных модулей компании Vicor (семейства

Maxi, Mini, Micro), но применение собственных схемотехнических решений позволило повысить значение КПД на 7% по сравнению с изделиями Vicor за счёт снижения рассеиваемой мощности. Обмотки силовых трансформаторов интегрированы в несущую печатную плату. В связи с этим существенно облегчён тепловой режим элементов схемы, что обеспечивает надёжную работу преобразователей.

Из-за различий рабочих характеристик оригинальных изделий Vicor и преобразователей Brick Wibbow

не рекомендуется использовать их совместно в системе распределённого питания во всём диапазоне мощностей. Для надёжной и устойчивой работы выходная мощность преобразователей в таком случае не должна превышать 50% от максимального значения.

Принцип и алгоритм работы интерфейса для обеспечения параллельной работы аналогичны алгоритму организации параллельного включения у модулей компании Vicor, синхронизирующие импульсы также имеют длительность около 20 нс. Это позволяет просто осуществлять замену в текущих проектах модулей Vicor, которые в течение многих лет применяются в высоконадёжных распределённых системах вторичного электропитания для ответственной радиоэлектронной аппаратуры. Немногие компании, предлагающие альтернативы модулям Vicor, реализуют функцию параллельной работы – только одна российская компания предлагает 600-ваттные модули собственной разработки в формате Brick для работы от сетей постоянного напряжения 300 В с выходным напряжением 28 В с встроенным цифровым двунаправленным портом PR.

Разводка магистралей между многочисленными платами

Часто необходимо распределить массив преобразователей на многочисленных печатных платах из-за требований к площади и температурным условиям. Разделение между платами внесёт дополнительный импеданс между преобразователями из-за дополнительной длины печатных проводников и соединительных проводов. Для предотвращения искажения сигналов управления вследствие разности импедансов разводки между преобразователями необходимо применить разделительный трансформатор, изолирующий шину PR. Рекомендуется размещать все преобразователи верхнего уровня на одной и той же плате. Это обеспечит минимальный уровень шума и задержку в линии между модулями верхнего уровня. Это особенно важно для очень больших массивов, которые будут критичны к воздействию высоких значений изменений тока di/dt и напряжения dV/dt . В том случае, когда применение требует резервирования между пла-

тами или между более чем 12 модулями, должна осуществляться двунаправленная буферизация. Но это находится за пределами рассмотрения данной статьи.

Между платами с относительно небольшими потерями сигнал PR должен быть проложен линией с небольшой индуктивностью.

Рекомендуется использовать витую пару, тогда как коаксиальный кабель для этой цели не подходит. Отражения, вызванные рассогласованием источника PR-шины, нагрузки и импеданса кабеля коаксиальным кабелем с низким уровнем потерь, демпфированы не будут, что приведёт к снижению качества импульсного сигнала PR.

Буферизация

Применение высокоскоростного буферного устройства может потребоваться для больших массивов или в том случае, когда расстояние между модулями больше, чем 30 см. Это происходит, потому что все модули, за исключением одного, который передаёт, находятся в режиме приёма. Каждый приёмник представляет собой нагрузку для модуля верхнего уровня (источник сообщения) примерно 500 Ом, шунтированную конденсатором 30 пФ (см. схему на рис. 7). Длинное соединение вносит потери и паразитное реактивное сопротивление на шине, которое ослабляет и искажает импульсный синхронизирующий сигнал. Ширина пропускания шины должна быть по крайней мере 60 МГц.

Одна простая и надёжная буферная схема для сигнала PR показана на рис. 8 и рис. 9. Система разделена на одну плату верхнего уровня (рис. 8) и ряд плат второго уровня (рис. 9). Плата верхнего уровня содержит пять модулей. Два из них сконфигурированы в демократический массив, где у одного модуля выходное напряжение установлено резистором R5 на 2% ниже относительно другого. Схема узла регулировки выходного напряжения модуля Brick показана на рис. 10. Установка постоянного напряжения осуществляется путём добавления резистора между выводом –S и выводом SC (для понижения выходного напряжения). Эти модули управляют двумя буферными схемами через вывод PR. Первая буферная схема (транзистор Q2) управляет тремя дополнительными модулями второго уровня на плате верхнего уровня. Вторая схема управ-

ляет платами второго уровня. Каждая плата второго уровня содержит пять модулей, сконфигурированных как повторители напряжения (усилители тока) с подключёнными выходами SC (вывод индикации состояния модуля) с выводами –S. На каждой плате второго уровня установлен развязывающий трансформатор, который развязывает входной сигнал PR. Этот сигнал затем буферизируется (транзистор Q1 на рис. 9) и подводится к каждому модулю второго уровня.

Буферные схемы, по существу, являются эмиттерными повторителями, которые используют pnp-транзистор общего назначения. Трансформаторы, обозначенные на схеме как T1, имеют коэффициент трансформации 1:1. Трансформаторы, обозначенные как T2, имеют коэффициент трансформации 2:1 для того, чтобы обеспечить лучшее согласование распределительной шины PR. Обратный провод каждого трансформатора или буферной схемы должен быть подключён к выводу –IN соответствующего преобразователя через обмотку развязывающего трансформатора. Вспомогательный источник питания 8 В обеспечивает достаточный запас по мощности для повторителей. Это маломощная шина, которая может быть получена из более высокого напряжения с использованием линейного стабилизатора. Отдельный вспомогательный источник питания должен быть выведен на каждую плату для того, чтобы была осуществлена развязка PR-шины. Весьма важным является высокочастотное шунтирование непосредственно на каждом буферном устройстве.

Из-за высокой частоты сигнала PR должно быть уделено особое внимание качеству сигнала на шине PR. В компоновке должны быть предусмотрены места для последовательного и демпфирующего резисторов, как показано на рис. 8 и 9. Размещение всех этих компонентов может не потребоваться для всех массивов – всё зависит от конфигурации шины PR. Но модули высокого уровня и ведомые модули на выводах PR должны иметь защитные диоды (D1) для защиты от обратной полярности.

Шунтирование

Выбор компонентов для шунтирования имеет важные последствия для стабильности и показателей электро-

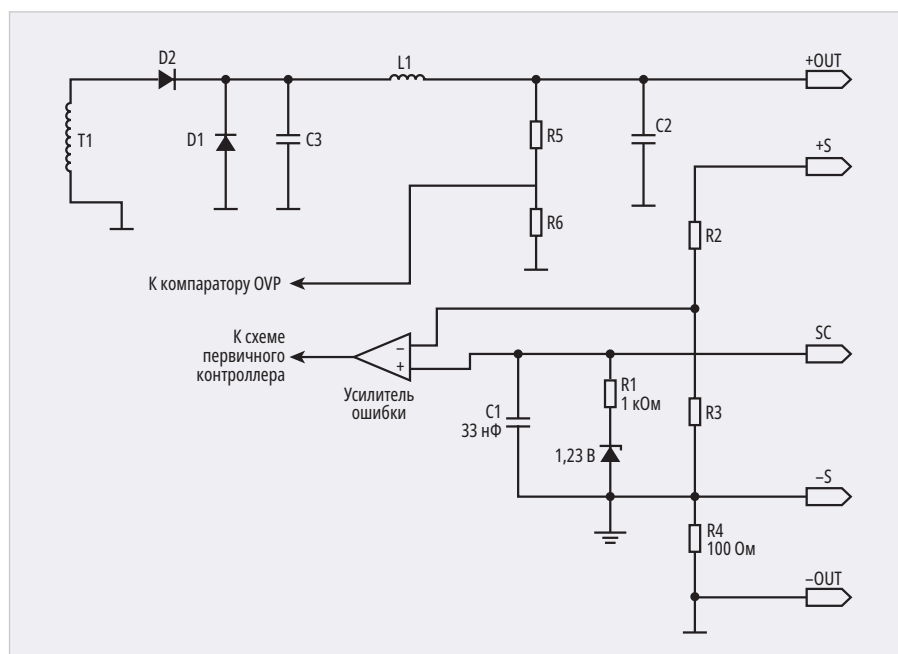


Рис. 10. Схема узла регулировки выходного напряжения – уменьшение выходного напряжения модуля верхнего уровня осуществлено подключением резистора R5 (49 кОм) между выводами –S и SC, как показано на рис. 8

магнитной совместимости массивов большой мощности. Шунтирование синфазной помехи для каждого преобразователя должно быть выполнено, как показано в руководстве пользователя.

Шунтирование дифференциальной помехи должно быть рассмотрено в двух аспектах. Низкочастотное шунтирование, которое сохраняет импеданс источника низким и стабилизирует в преобразователе петлю обратной связи по напряжению, и высокочастотное шунтирование, которое подавляет импульсы, имеющие отношение к электромагнитным помехам, должны быть выполнены в соответствии с руководством по эксплуатации. Входной импеданс массива преобразователей определяется как отрицательный импеданс отдельного модуля, делённый на количество преобразователей в массиве. Это может представлять серьёзную проблему для очень большого массива с низким входным напряжением, где импеданс должен поддерживаться очень низким.

Пример массива с мощностью 4,1 кВт и током нагрузки 817 А

Представленный далее опытный образец был выполнен на основе модулей, размещённых на макетных платах и соединённых, как показано на рис. 8 и 9. В прототипе используется 25 модулей WBB200-300H5BN, рабо-

тающих параллельно. Сборка имеет входное напряжение 300 В, выходное напряжение 5 В с суммарным током в нагрузку 817 А и состоит из массивов, объединённых в матрицу 5×5. Предусмотрен запас по мощности примерно 15%. Выходные соединительные проводники должны иметь очень большой диаметр, для того чтобы обеспечить достаточную токовую нагрузку, чтобы надёжно проводить сильные выходные токи. Для уменьшения риска помех, которые могут послужить причиной потери управления модулями высокого уровня, присутствует резистор R5, понижающий выходное напряжение на 2%. Когда используются преобразователи Half Brick в массивах параллельно включённых модулей, крайне важно, чтобы выходное напряжение каждого модуля высокого уровня настраивалось на разное значение с минимальной разницей в 2%.

Выводы РС (управление включением с первичной стороны) преобразователей имеют диоды, включённые по схеме «ИЛИ» для обеспечения группового включения/выключения в массиве. Этот сигнал может обеспечить внешняя схема управления, такая как микропроцессор (модуль контроля и управления). Весьма важно наличие в модулях схемы блокировки при минимальном входном напряжении и перенапряжении на входе. Вследствие падения напряже-

ния между входными проводниками отдельных плат для корректного управления выводами РС (сигнал Group Enable/Disable) должна использоваться оптопара (см. рис. 8 и 9).

Для шунтирования дифференциальной и синфазной составляющих пульсаций входного тока добавлены конденсаторы. Кроме того, параллельно входу всего массива добавлена демпфирующая цепь из последовательно включённых конденсатора 24 мкФ и резистора 6,8 Ом (рис. 11). Метод определения значений этих компонентов при полной нагрузке 4,1 киловаттного массива приводится в документации.

Проверка системы

Даже детальный расчёт массива не может спрогнозировать все факторы, которые будут влиять на технические характеристики. Для определения оптимальных параметров компонентов и исключения возможных проблем рекомендуется проводить тщательную проверку на этапе макетирования. Испытания должны включать динамическое изменение нагрузки, проверку пульсаций на входе и выходе, анализ частотной характеристики на запас устойчивости по фазе и качество сигнала на шине PR. Для безопасности и упрощения проверки первичное включение питания следует выполнять для подгруппы модулей. Например, плата с модулями верхнего уровня упомянутого ранее массива была протестирована первой, и затем система тестируется по мере добавления каждой новой платы нижнего уровня.

Необходимо оценить значение показателя безотказности с учётом загрузки модулей $(N/[N+1]) \cdot I_{ннр}$, $I_{нн}$ – номинальное значение выходного тока модуля), средней наработки до отказа при реальной температуре корпуса и минимальном значении уровня вероятности безотказной работы (γ) для устройств силовой электроники, равным 95%, а также своевременном проведении предусмотренных регламентных работ.

Оценка значения показателя безотказности для реальной системы вторичного электропитания, реализованной на основе 600-ваттных модулей Brick с выходным напряжением 28 В и входным напряжением 300 В для различных способов резервирования, рассмотрена в работе [5].

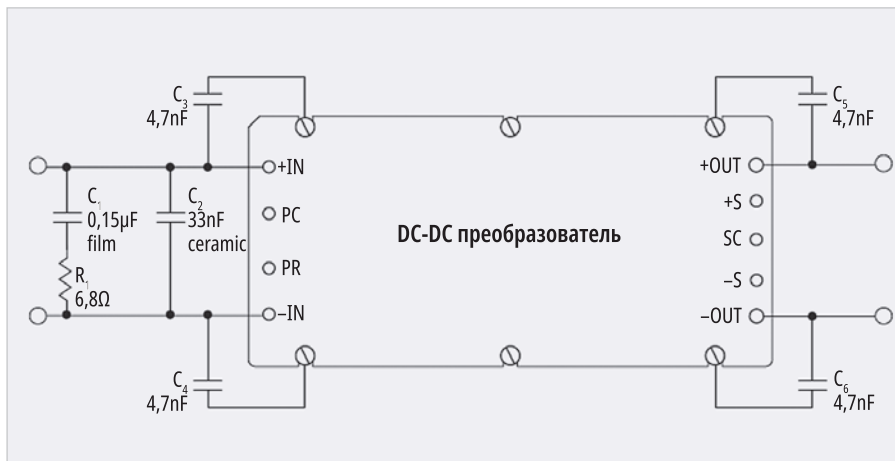


Рис. 11. Шунтирование дифференциальных и синфазных помех на каждом модуле 4,1 кВт матрицы

Применение в системах электропитания резервирования и специальных алгоритмов функционирования позволяет достичь очень высоких значений наработки на отказ при достаточно жёстких значениях γ (95% и выше).

Заключение

Перед разработчиками систем электропитания, стремящимися создать

структуру с повышенной надёжностью, возникает много проблем. Осведомлённость об общих подводных камнях в системе, устойчивой к отказам, и доступность высокоэффективных модулей питания с необходимым комплектом сервисных и защитных функций для реализации высоконадёжных систем позволяют разработчикам достичь недоступных ранее уровней надёжности.

Поскольку мир становится всё более зависимым от коммуникационных технологий, время вынужденного простоя системы становится менее допустимым, чем когда-либо прежде.

Литература

1. Золло Б. Достоинства и недостатки систем защиты от перенапряжения // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
2. Патока М. Основы объединения систем электропитания // Электронные компоненты. 2007. № 8.
3. Джонстон Дж. Выбор силовых полевых транзисторов для контроллеров ORING MOSFET // Электронные компоненты. 2015. № 12.
4. Герасимов А.А., Кастров М.Ю., Лукин А.В. Принудительное распределение тока нагрузки в резервированных системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2002. № 7.
5. Либенко Ю.П., Четин А.Н. Способы обеспечения параметрической многовариантности системы вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой // Электропитание. 2011. № 1. ©



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МОДУЛИ ПИТАНИЯ

- ✦ Совместимость с модулями питания DC-DC 2-го и 3-го поколений компании Vicor
- ✦ Обширный выбор моделей с выходными мощностями от 75 до 600 Вт
- ✦ Входные напряжения 9-77 В, 100-425 В
- ✦ Форм-факторы Full Brick, Half Brick, Quarter Brick
- ✦ Широкий диапазон рабочих температур от -55 до +100 °C






АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

+7 (495) 232-52-22 + INFO@PROCHIP.RU + WWW.PROCHIP.RU

