

## OKD: семейство PMBus-совместимых PoL DC/DC-преобразователей для питания ПЛИС, процессоров и специализированных ИС

Владимир РЕНТЮК  
rvk.modul@gmail.com  
Сергей ПРЕМЯКОВ

Sergey.Premyakov@symmetron.ru

**Рассмотрены технические характеристики и особенности применения как серийных, так и новейших DC/DC-преобразователей линейки OKD от компании Murata, которые предназначены для питания ПЛИС (FPGA), специализированных микросхем (ASIC) и процессоров, адаптированных под архитектуру распределенного питания с технологией PoL.**

Ведущих инженерно-технических изданиях, в том числе и в журнале «Компоненты и технологии», неоднократно рассматривались проблемы организации питания современного электронного оборудования. И это понятно, поскольку от правильного построения данных систем напрямую зависит не только их эффективность, но и их работоспособность в целом. Однако в современных условиях разработать систему не слишком простая задача. В чем же дело? Во-первых, в ужесточении традиционных требований к питанию, таких как стабильность, уровень шумов и помех, в том числе и пульсаций, на шинах питания. Во-вторых, высокий КПД в широком диапазоне входных и выходных напряжений и нагрузок. Кроме того, все чаще возникает потребность в обеспечении высокой удельной плотности мощности. Проблема в том, что нам часто нужны токи в десятки ампер в крайне ограниченном по площади пространстве. Это касается и столь популярного построения системы, как распределенная архитектура с конечной организацией питания по технологии «точка-точка» — PoL (англ. PoL — Point-of-Load).

Эта архитектура не является чем-то новым и стала уже привычной. Ее особенность заключается в том, что от входного, возможно даже нестабильного источника напряжения, создается промежуточная шина с пониженным напряжением, от которой могут формироваться еще шины, а сами нагрузки питаются от выделенных именно для них DC/DC-преобразователей. Достоинство такой архитектуры в уменьшении числа шин питания, генерируемых ими помех и проблем, связанных с длинами линий подключения, что особенно ярко про-

является на мощных точечных нагрузках. И вот здесь, как говорится, и зарыта собака. У многих читателей сложилось мнение, будто в подобной архитектуре имеется общий мощный источник питания для формирования основной промежуточной шины, а DC/DC-преобразователи, представляющие компоненты PoL, — это рассыпанные по платам конечного изделия маломощные изолированные или неизолированные импульсные стабилизаторы, как это показано в [1]. Однако в современной аппаратуре есть целый ряд конечных нагрузок, требующих мощность по цепи питания в десятки ватт. Имеются в виду программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), специализированные микросхемы (СБИС), мощные высокопроизводительные процессоры, а также платы компьютеров и программируемых логических контроллеров. И если выбор DC/DC-преобразователей малой мощности в общем не затруднен (подходы к нему детально представлены в [2]), то выбор мощных преобразователей для организации питания таких нагрузок по системе PoL не столь очевиден. Для разработчика очевидно: самостоятельно проектировать и изготавливать такие сложные устройства явно не стоит, тем более что тут возникает ряд дополнительных проблем.

В чем же заключаются эти проблемы? Разумеется, они кроются в специфике организации питания и непосредственно связаны с особенностями данных нагрузок. Чаще всего это вызвано необходимостью соблюдения очередности подачи и снятия питающих напряжений и требованиями по диагностике. Кроме того, уже в процессе отладки конечного устройства часто нужно внести коррективы в питающие напряжения, например

для компенсации потерь на линиях подключения. И это лучше делать не изменением и подгонкой номиналов резисторов, задающих выходное напряжение компонентов, что в готовых изделиях делать крайне неудобно и при высокой плотности монтажа просто проблематично, а программно, что удобно и не накладно. Для этих целей создана специальная управляющая шина PMBus (англ. PMBus — Power Management Bus, «цифровая шина управления питанием»). Шина управления питанием PMBus — это вариант шины системного управления (SMBus), предназначенной для цифрового управления источниками питания. Подобно SMBus, она представляет собой двухпроводный коммуникационный протокол на основе I<sup>2</sup>C и, кроме программной установки выходного напряжения, позволяет реализовать большое число специфических команд, включая установку защиты, текущие измерения, общее управление, диагностику и передачу информации вверх по иерархической лестнице.

Именно такими изделиями являются неизолированные DC/DC-преобразователи серии OKD, предлагаемые компанией Murata, которые были специально разработаны ее ведущими специалистами для питания ПЛИС (FPGA), специализированных микросхем (ASIC), процессоров. Преобразователи этой серии могут быть эффективно использованы и в системах, требующих организации распределенной архитектуры питания, для формирования напряжения промежуточной шины, в серверах и приложениях для хранения данных, а также в сетевом оборудовании. Для формирования основного напряжения промежуточной шины компания Murata не так давно предложила свои новейшие мощные DC/DC-преобразователи [3].

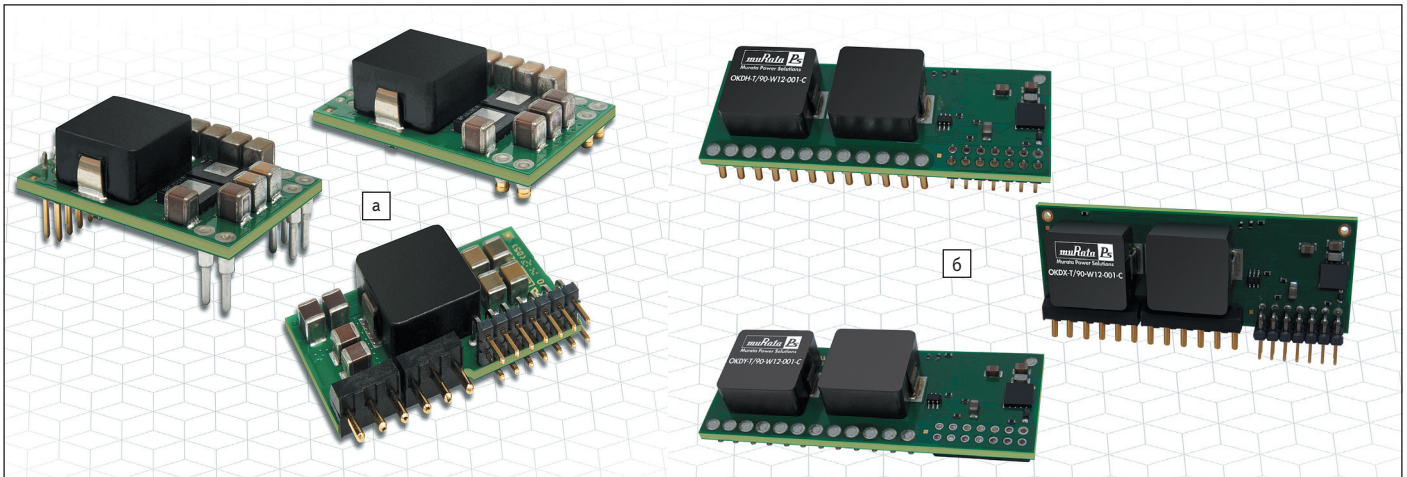


Рис. 1. DC/DC-преобразователи серии OKD компании Murata: а) OKDx-T/20-W12-xxx-C (20 А/66 Вт); б) OKDx-T/90-W12-xxx-C (90 А/162 Вт)

К ним для создания PoL-напряжений для нагрузок с высокой мощностью могут быть добавлены неизолированные DC/DC-преобразователи серии OKD, которые выпускаются под уже хорошо зарекомендовавшей себя торговой маркой Okami. Здесь необходимо отметить, что хотя изолированные преобразователи имеют неоспоримые преимущества, но для данной задачи — организация питания ПЛИС (FPGA), специализированных микросхем (ASIC) и процессоров — нужны именно неизолированные преобразователи с высокой стабильностью выходного напряжения и широким диапазоном допустимых нагрузок. Последнее связано с тем, что, например, процессоры не всегда работают с полной нагрузкой и для экономии энергии часто переводятся в спящий или дежурный режим с предельно низким энергопотреблением или вообще отключаются, если это часть системы резервирования. Причем процессору необходимо быстро и должным образом, с соблюдением очередности подачи напряжения на плату, проснуться, а его источник или источники питания не должен иметь при таком сбросе/набросе нагрузки недопустимых переходных процессов в отклике выходного напряжения. Понятно, что при больших нагрузках реализовать это достаточно сложно.

В настоящее время OKD-серия DC/DC-преобразователей, предлагаемая компанией Murata, включает девять компонентов, рассчитанных на токи 6–90 А. Поскольку, как говорил известный Козьма Прутков, нельзя объять необъятное, ограничимся рассмотрением мощных представителей этой весьма удачной во всех отношениях серии, а именно DC/DC-преобразователей, рассчитанных на токи 20, 25, 40, 50, 60 и 90 А [4–9]. Они, как и менее мощные представители данной серии, доступны в виде законченных модулей, требующих лишь добавки входных и выходных конденсаторов и резисторов подтяжки на шине PMBus. Преобразователи доступны в трех форм-факторах конструктивного ис-

полнения: горизонтальное с выводами для монтажа в отверстие (through-hole), SIP (вертикальное, с торцевым разъемом для подключения) и горизонтальное под технологию поверхностного монтажа SMT (рис. 1), включая вариант с шариковыми выводами LGA. Доступные варианты конструктива для каждой модели указаны в спецификациях.

DC/DC-преобразователи серии OKD компании Murata — это высокоэффективные синхронные одно- и двухфазные преобразователи для решений PoL с поддержкой интерфейса PMBus. Они поставляются с возможностью различной конфигурации прошивки под самые разнообразные системы и предусматривают настройку и конфигурирование в соответствии с требованиями к различным решениям. Используемый в преобразователях протокол PMBus обеспечивает полноценный мониторинг и конфигурирование настроек преобразователя, выполняемых с помощью стандартных цифровых команд. Подобная PMBus-совместимость позволяет контролировать и конфигурировать все критические требования к производительности на системном уровне.

Помимо стандартных характеристик архитектуры PoL и функций безопасности, таких как установка выходного напряжения внешним резистором, перегрузки по току, защита от повышенного напряжения, от перегрева и недопустимо пониженного входного напряжения, преобразователи серии OKD обладают другими дополнительными функциями. В частности, имеется программная установка выходного напряжения и параметров его включения/выключения, цифровое разделение по току (полная мощность, без снижения номинальных характеристик), нелинейная реакция на переходной процесс (сброс/наброс нагрузки) с его подавлением, оптимизированное управление паузой рабочего цикла. В них предусмотрена синхронизация по рабочей частоте и размытие спектра электромагнитных помех путем частотной модуляции рабочей частоты преоб-

разования. Преобразователи серии OKD сертифицированы по стандарту безопасности UL/IEC/EC 60950-1, отвечают регламентам RoHS 6 (без исключения п. 7b, подразумевающего наличие свинца на выводах) и признаны консорциумом AMP как источники питания с архитектурой, отвечающей современным нормам.

Нелинейная реакция на переходные процессы с сокращением времени отклика и отклонений выходного напряжения при сбросе/набросе нагрузки реализована благодаря использованию динамической компенсации, предназначенной для управления преобразованием в источниках питания. При этом параметры управляющей ПИД-цепи автоматически рассчитываются и настраиваются в зависимости от рабочих условий преобразования и параметров его выходного фильтра (суммарной емкости выходных конденсаторов). Кроме того, цифровая схема распределения по току позволяет со 100%-ной точностью распределять ток по семи параллельно включенным преобразователям данной серии. Этот подход позволяет уменьшить входные емкости, уровень пульсации и, соответственно, величину кондуктивных помех по входной шине, а также благодаря оптимизации управления холостым ходом, реализованной для повышения эффективности работы схемы, снизить общие потери.

Управление питанием через PMBus позволяет выполнить и настройки для плавного включения и выключения, установить пределы срабатывания защиты по превышению напряжения, по уровню входного и выходного напряжений, перегрузки по току и по превышению установленной допустимой температуры, реализовать операции включения/выключения (On/Off). Также предусмотрен монитор текущего состояния по выходному напряжению ( $V_{out}$ ), выходному току ( $I_{out}$ ), входному напряжению ( $V_{in}$ ), температуре (Temp), а также флаги Power good и On/Off. Словом, DC/DC-преобразователи серии OKD имеют весьма развитые функции



Рис. 2. Символика, принятая в наименованиях DC/DC-преобразователей серии OKDx-T/AA-W12(E)-xxx-C

Таблица. Основные типовые параметры DC/DC-преобразователей серии OKD компании Murata

Параметр	OKDx-T/20	OKDx-T/25	OKDx-T/40	OKDx-T/50	OKDx-T/60	OKDx-T/90
Входное напряжение, В	4,5–14					7,5–14
Выходное напряжение, В	0,6–3,3					0,6–1,8
Диапазон выходного напряжения с учетом расширения, В	0,54–3,63					0,54–1,98
Максимальный рабочий выходной ток, А	20	25	40	50	60	90
Минимально допустимый ток нагрузки, А	0,001					0
Максимальная выходная мощность, Вт	66	82,5	132	165	108	162
Точность установки выходного напряжения	±0,025%				±1,2 мВ	±0,025%
Суммарная нестабильность выходного напряжения						±1%
Суммарная нестабильность выходного напряжения в режиме распределения тока						±2%
КПД	97,1% <sup>1</sup>		97,2% <sup>1</sup>		94,9% <sup>2</sup>	94,3% <sup>3</sup>
Уровень выходных шумов и пульсаций в полосе до 20 МГц (при минимальной внешней выходной емкости), мВ (п-п)	40 V <sub>out</sub> = 1,8 В	40 V <sub>out</sub> = 1,8 В	25 V <sub>out</sub> = 1,8 В	30 V <sub>out</sub> = 1,8 В	7 V <sub>out</sub> = 1 В	3,5 V <sub>out</sub> = 1 В
Диапазон рабочих частот, кГц	200–640 (центральная 320)					
Средняя наработка на отказ, MTBF (Telcordia SR-332, Issue 2 Method 1), ч	20,2 млн	20,2 млн	14,2 млн	14,2 млн	50 млн	14,95 млн
Диапазон рабочих температур, °С	–40...+125				–40...+150	
Габаритные размеры, мм	26,3×7,6×15,6 (SIP)	26,3×7,6×15,6 (SIP)	33×7,6×18,1 (SIP)	33×7,6×18,1 (SIP)	25,1×14,1×7 (LGA)	50,8×9,51×19,05 (SIP)

**Примечания.**

1. V<sub>in</sub> = 5 В, V<sub>out</sub> = 3,3 В, нагрузка 50%. 2. V<sub>in</sub> = 5 В, V<sub>out</sub> = 1,8 В, нагрузка 50%. 3. V<sub>in</sub> = 12 В, V<sub>out</sub> = 1,8 В, нагрузка 50%.

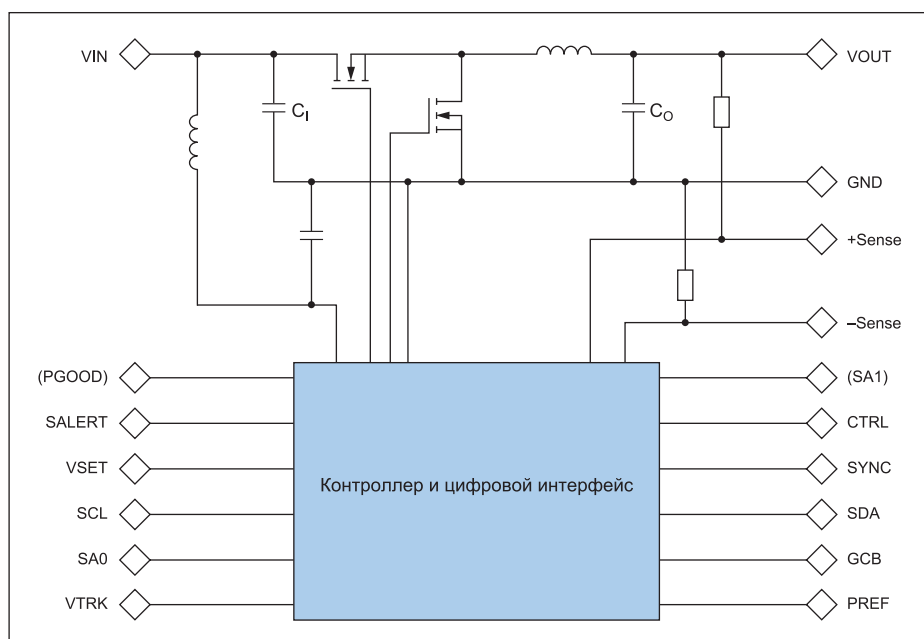


Рис. 3. Общая схема DC/DC-преобразователя 20 А с цифровым управлением серии OKDx-T/20-W12-xxx-C

и широкие возможности в части внутреннего и внешнего управления.

Что касается удельной плотности мощности, то, например, 20-А версия DC/DC-преобразователя имеет объемную плотность мощности 6,4 Вт/см<sup>3</sup>, а 90-А версия — 9,8 Вт/см<sup>3</sup>. Это достаточно высокий показатель, возможно, даже один из лучших для преобразователей такого класса. Основные типовые технические характеристики преобразователей приведены в сводной таблице. Но сначала разберемся в тонкостях маркировки самих преобразователей. Для примера рассмотрим OKDx-T/AA-W12(E)-xxx-C (рис. 2).

Возможные для заказа варианты DC/DC-преобразователей серии OKD приведены в соответствующих спецификациях [4–9], доступных на сайте компании Murata.

В качестве иллюстрации особенностей применения рассматриваемых DC/DC-преобразователей так же возьмем два крайних варианта — преобразователь, рассчитанный на ток 20 А, и преобразователь на ток 90 А. Схема первого варианта приведена на рис. 3 [4], второго — на рис. 4 [9].

Как видно на рис. 3 и 4, DC/DC-преобразователи с токами до 90 А являются однофазными, а преобразователь, рассчитанный на рабочий ток 90 А, — двухфазным. На платах модулей, кроме контроллера с цифровым интерфейсом, имеются входные и выходные конденсаторы, силовые ключи в виде МОП-транзисторов, дроссели и другие дискретные элементы, что значительно упрощает их применение. Типовая схема включения в системе с компенсацией падения напряжения на линиях связи с нагрузкой (об этой опции ниже) на примере преобразователя OKDx-T/20-W12-xxx-C с реализацией управления по шине PMBus представлена на рис. 5 [4].

Для достижения заданных характеристик DC/DC-преобразователя серии OKD, хотя в модулях и имеются входные и выходные конденсаторы, их недостаточно, что, естественно, требует установки по входу и вы-

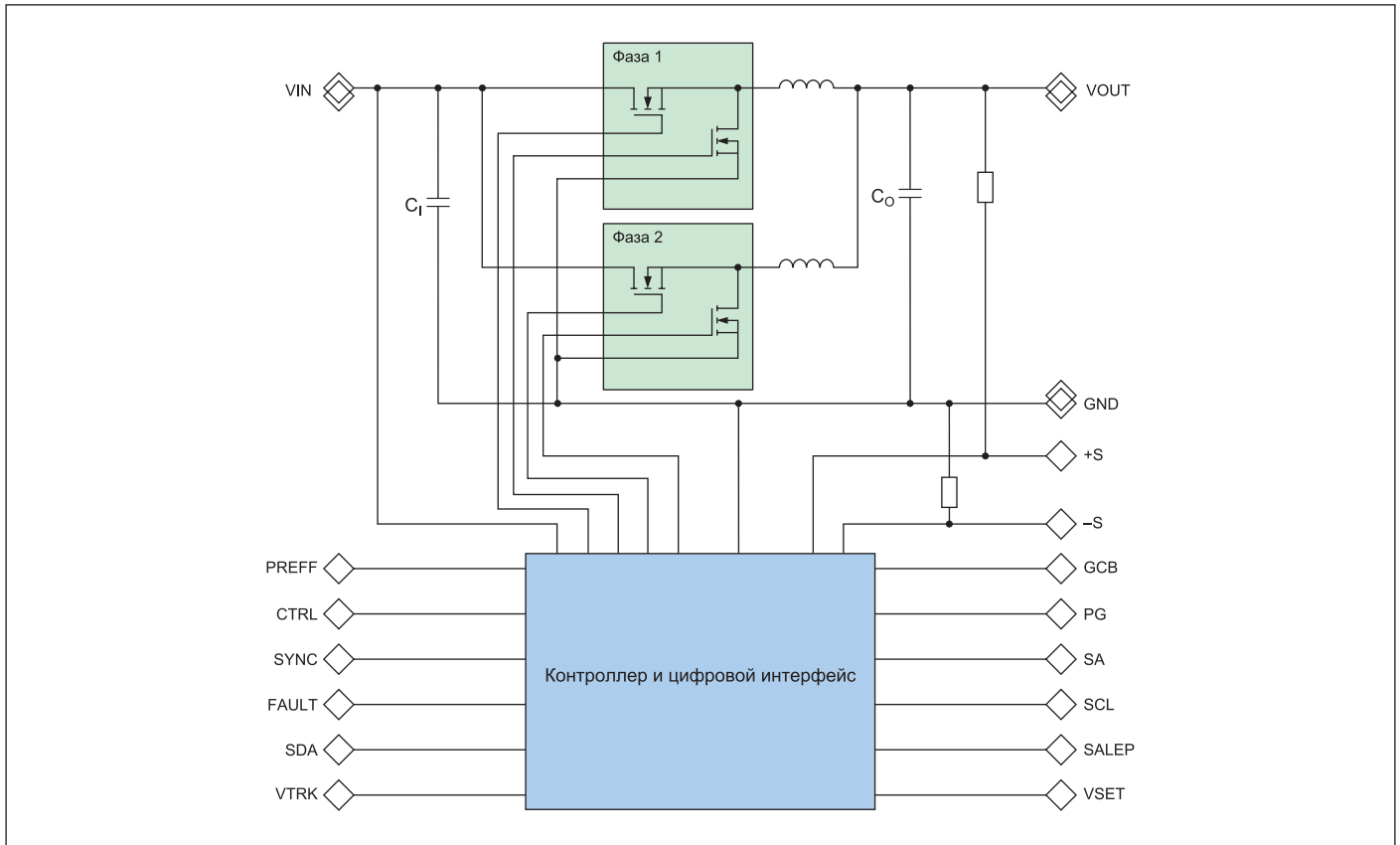


Рис. 4. Общая схема DC/DC-преобразователя 90 А с цифровым управлением серии OKDx-T/90-W12-xxx-C

ходу внешних конденсаторов. Для моделей с током до 50 А включительно рекомендуется установка по входу электролитического конденсатора минимальной емкостью 470 мкФ с ESR не выше 10 мОм, для модели, рассчитанной на ток 60 А, требуется установка дополнительно восьми конденсаторов номиналом 47 мкФ, а для модели с током 90 А — одного электролитического конденсатора емкостью 1000 мкФ с ESR, равным 8 мОм, и 24 конденсаторов емкостью 10 мкФ. Что касается выходных конденсаторов, то для

моделей с током до 50 А включительно рекомендуется установка по входу электролитического конденсатора минимальной емкостью 470 мкФ с ESR, не превышающим 0,01 Ом. Для моделей, рассчитанных на токи 60 и 90 А, нужны 10 электролитических конденсаторов емкостью 470 мкФ с ESR не более 5 мОм и 10 конденсаторов емкостью 100 мкФ. Кроме того, в спецификациях на данные преобразователи представлена методика расчета выходных конденсаторов, а на преобразователи с током нагрузки до 50 А включительно приведены и графики зависимости уровня пульсаций выходного напряжения от значения их выходной емкости. Для иллюстрации эффективности выходного фильтра и работы системы внутреннего регулирования реакции на сброс/наброс

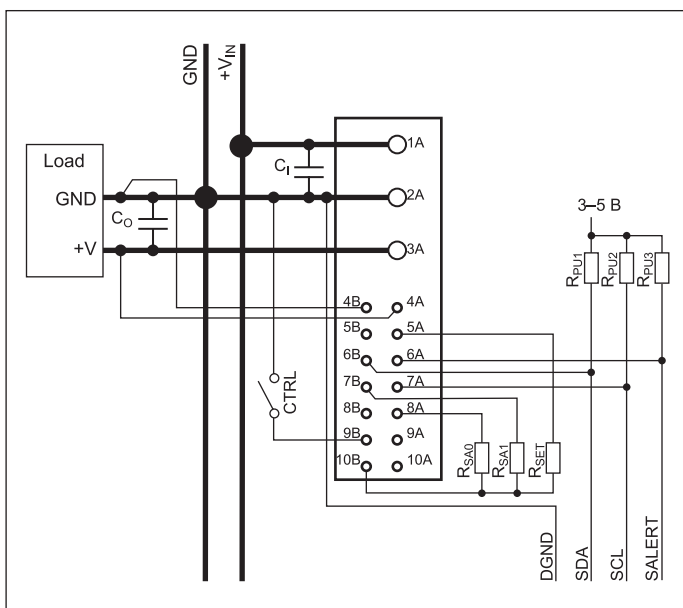


Рис. 5. Типовая схема включения с реализацией управления по шине PMBus на примере преобразователя OKDx-T/20-W12-xxx-C в исполнении SIP (вид сверху)

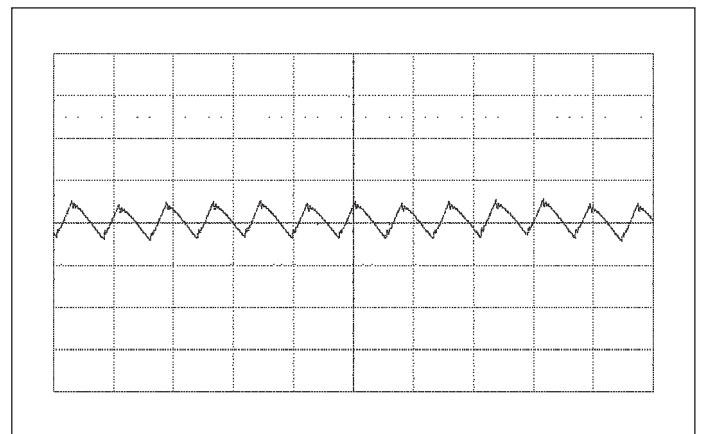
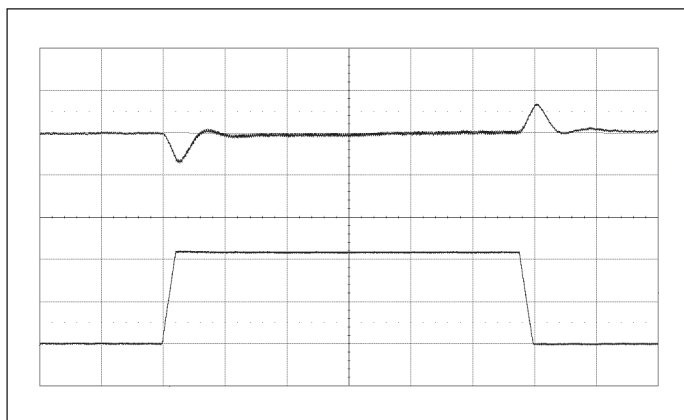


Рис. 6. Переменная составляющая выходного напряжения DC/DC-преобразователя OKDx-T/90-W12-xxx-C. Условия измерения:  $V_0 = 1,8$  В,  $V_1 = 12$  В,  $I_0 = 90$  А,  $C_{OUT} = 10 \times 470$  мкФ/5 мОм +  $10 \times 100$  мкФ. Масштаб: 5 мВ/дел., 2 мкс/дел., ширина полосы 20 МГц



**Рис. 7.** Ответная реакция на сброс/наброс нагрузки DC/DC-преобразователя OKDx-T/90-W12-xxx-C. Условия измерения: изменение тока нагрузки 22,5–67,5–22,5 А,  $V_0 = 1,8$  В,  $V_1 = 12$  В,  $I_0 = 90$  А,  $C_{OUT} = 10 \times 470$  мкФ/5 мОм +  $10 \times 100$  мкФ. Масштаб:  $di/dt = 2$  А/мкс, усиление ASCR = 350, остаточное усиление ASCR = 90. Масштаб: 50 мВ/дел., 20 А/дел., 100 мкс/дел.

нагрузки воспользуемся рис. 6 и 7, где приведены эти характеристики для 90-А модели OKDx-T/90-W12-xxx-C. Для получения детальной информации о шумах, помехах и пульсациях выходного напряжения следует обратиться к разделу Output Ripple and Noise, а сведения о реакции на сброс/наброс нагрузки и изменении входного напряжения доступны в разделе Dynamic Loop Compensation [9].

Как уже отмечалось в начале статьи, все рассматриваемые преобразователи используют полностью цифровой контур управления, который обеспечивает точный контроль всего процесса преобразования мощности, что и дает очень высокую гибкость, облегчающую их использование. Именно поэтому мы видим на осциллограмме, приведенной на рис. 7, минимальный выброс без характерного «звона» — хвоста в виде затухающего гармонического колебания.

Данная реакция связана с тем, что в рассматриваемых преобразователях реализуется нелинейный алгоритм управления режимом заряда суммарной выходной емкости, который реагирует на изменения выходного тока в течение одного цикла переключения ШИМ. Таким образом, достигается меньшее время реакции на изменения выходного напряжения с использованием меньшей выходной емкости, чем у традиционных ШИМ-контроллеров. Это снижает общие затраты и экономит пространство на плате. Управление может быть установлено с большей или меньшей ответной реакцией, что осуществляется настройкой коэффициента усиления ASCR, установленного командой ASCR\_CONFIG управляющей шины PMBus. Увеличение коэффициента усиления, то есть скорости ответной реакции контура управления, уменьшит отклонение напряжения при переходных процессах, связанных с ступенчатым изменением нагрузки, но за счет несколько увеличенного уровня пульсации

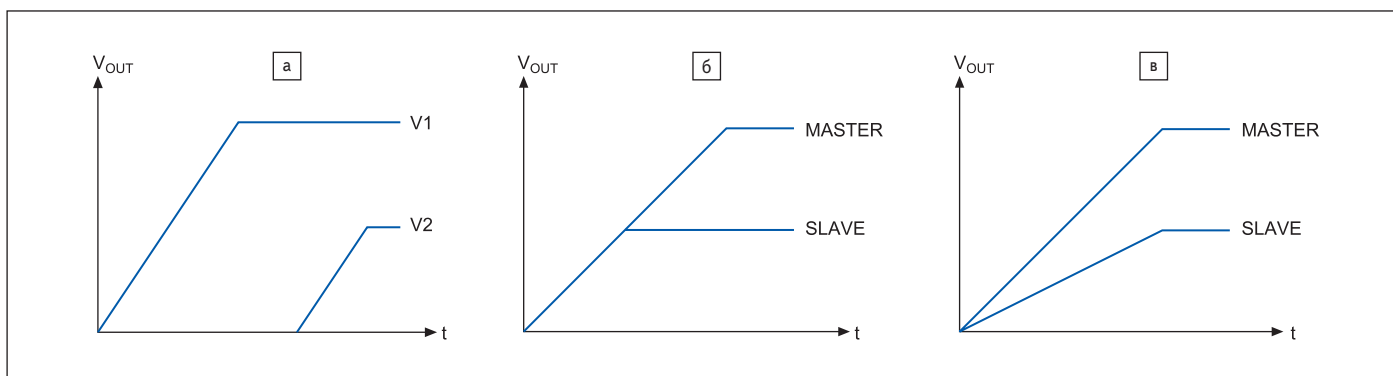
на выходе. В общем, ничто в мире не достается даром. Типичный диапазон установки коэффициента усиления ASCR для OKDx-T/90-W12-xxx-C выбирают в пределах 200–600.

Пользователь может также настроить остаточный коэффициент усиления, заданный командой ASCR\_CONFIG, что необходимо для сокращения времени восстановления переходного процесса после изменения нагрузки. Типичный допустимый диапазон остаточного коэффициента усиления ASCR для OKDx-T/90-W12-xxx-C находится в пределах 70–127. Остаточный коэффициент усиления ASCR, превышающий 127, может вызвать повреждение преобразователя и, следовательно, не должен использоваться. Здесь нужны компромисс и известная осторожность, поскольку, с другой стороны, коэффициент усиления также влияет и на время восстановления.

По умолчанию устройство сконфигурировано со средним коэффициентом усиления, который обеспечивает компромисс между характеристиками компенсации переходных процессов, связанных со ступенчатым изменением нагрузки и пульсациями выходного напряжения. Этот параметр выбран так, чтобы отвечать широкому диапазону условий эксплуатации. Для конкретного применения коэффициент усиления может быть увеличен для улучшения отклика на изменение нагрузки. Вопрос функционирования и компенсации петли регулирования достаточно сложен, тем более для цифрового варианта, и требует отдельного рассмотрения, которое не входит в задачи данной статьи. Достаточно полно и со всеми детальными сопутствующими расчетами он представлен, например, в [10].

Как уже отмечалось ранее, рассматриваемые преобразователи допускают параллельное включение в многофазном режиме. А в чем еще состоит их особенность, позволившая позиционировать их как преобразователи, адаптированные для архитектуры PoL? Эта особенность заключается в возможности организовывать включение таких преобразователей в системе с заданной последовательностью в одном из трех вариантов, представленных на рис. 8. При этом несколько преобразователей серии OKD конфигурируются для включения в определенной последовательности. Эта функция особенно полезна при питании плат компьютеров, процессоров, ПЛИС и специализированных микросхем, которые требуют, чтобы напряжение одного из источников питания достигло заданного уровня до включения другого источника или выполняло этот процесс в той или иной степени синхронно. Последовательность включения нескольких преобразователей может быть достигнута настройкой задержки запуска и времени нарастания каждого устройства через интерфейс PMBus и использования сигнала запуска CTRL (рис. 8а).

Нам доступен также режим слежения (рис. 8б), при котором преобразователь автоматически подстраивает скорость нарастания своего выходного напряжения под скорость изменения напряжения на входе VTRK. Еще один доступный вариант — ратиометрическое, или пропорциональное следящее увеличение напряжения (рис. 8в). В этом режиме преобразователь настраивает свое выходное напряжение в процентах от напряжения, подаваемого на вывод VTRK.



**Рис. 8.** Возможные варианты организации последовательности включения DC/DC-преобразователей серии OKD компании Murata в архитектуре распределенного питания технологии PoL

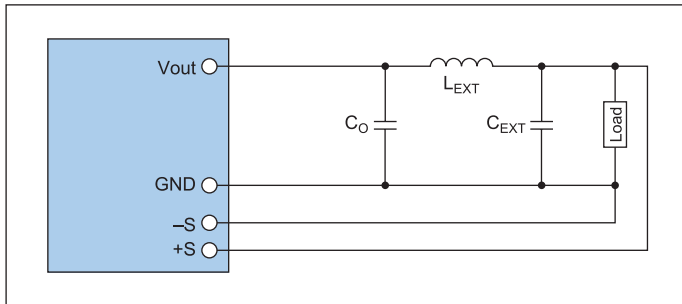


Рис. 9. Подключение DC/DC-преобразователя серии OKD компании Murata с компенсацией падения напряжения на линиях связи и выходном  $\pi$ -фильтре

Значение по умолчанию — 50%, но при необходимости может быть установлен иной коэффициент отслеживания. Это достигается установкой внешнего резистивного делителя напряжения или выполняется непосредственно через интерфейс PMBus.

При такой архитектуре необходимо учитывать, что ведущим преобразователем (master) в группе отслеживания назначается устройство, которое имеет наивысшее конечное напряжение в группе. Этот ведущий преобразователь и будет управлять скоростью нарастания напряжения остальных отслеживающих устройств (slave), и он не должен быть сконфигурирован в режим отслеживания. Все контакты CTRL в группе отслеживания должны быть подключены и управляться одной внешней командой управления. Следует отметить, что группы, сформированные для распределения тока, которые также настроены для отслеживания другого напряжения, не обеспечивают защиту перед смещением. Поэтому здесь обязательно должна быть обеспечена минимальная нагрузка. И хотя для обычного включения преобразователя данной серии она не требуется, но при подобном активировании это необходимо, чтобы избежать ситуации, когда выходное напряжение могло бы удерживаться каким-либо сторонним напряжением, например остаточным зарядом емкостей конечного устройства. Для иллюстрации того, насколько важно соблюдать последовательность подачи напряжения, приведу случай из жизни. В одном из проектов наша группа использовала плату промышленного компьютера форм-фактора mini-ATX с разработанной нами системой питания. В один прекрасный день часть плат отказалась запускаться. После долгих и, поверьте, непростых разбирательств было установлено, что проблема кроется в неверной временной задержке подачи одного из питающих напряжений. Причина была в ошибке, допущенной монтажником платы блока питания, — был установлен керамический чип-конденсатор не того номинала (читателям известно, что такие конденсаторы в отличие от резисторов не имеют маркировки и найти причину отказа мы смогли, только вооружившись осциллографом и измерив время задержки в очередности подачи питающих напряжений). Насколько все было бы проще (и даже вообще исключено), если бы такая очередность устанавливалась программно!

А в завершение развею законные сомнения читателей насчет того, есть ли гарантия, что при таких высоких токах именно на нагрузке, а не на выходе рассматриваемых преобразователей будет необходимое нам напряжение? Особенно если речь идет о динамических нагрузках, для которых спрогнозировать падение напряжения на шинах подключения невозможно. Да, в DC/DC-преобразователях серии OKD компании Murata — будет. Для этого достаточно использовать предусмотренные в схемах всех преобразователей входы для компенсации падения напряжения между выходом и точкой нагрузки (Load), как показано на рис. 9. Причем линии связи должны быть выполнены симметрично в виде дифференциальной пары. Кроме того, желательно, чтобы они были экранированы заземляющим слоем на печатной плате. Это необходимо для снижения воздействия на входы шумов помех. Если данная

возможность не используется, то вход +S должен быть подсоединен к  $V_{out}$ , а вход -S — к общему проводу GND. В случаях, когда внешний выходной фильтр включает индуктор (формирующий  $\pi$ -фильтр) в соответствии с рис. 8, резонансная частота  $L_{EXT}/C_{EXT}$  устанавливает верхний предел полосы пропускания контура контроллера. Если резонансная частота достаточно высока, то цепи компенсации падения напряжений на линиях подключения могут быть подсоединены после фильтра (как показано на рисунке), но если резонансная частота низка, а падение напряжения на катушке  $L_{EXT}$  приемлемо — необходимо заранее провести макетирование и определить чувствительность преобразователя к такому подключению. Здесь следует учитывать не только емкость конденсаторов, подключенных к выходу преобразователя, но и емкости самой нагрузки. Максимальное напряжение для компенсации равно  $V_{DROP_{MAX}} = (5,5 - V_O)/2$ . Бóльшее напряжение приведет к разбалансировке преобразователя и нарушит его функционирование.

Неискушенный читатель может возразить, что если не использовать  $\pi$ -фильтр, то и проблем не возникнет. Это не то чтобы не совсем так, это вообще не так. Он появится вне вашего желания, поскольку в роли  $L_{EXT}$  будет выступать индуктивность проводника подключения нагрузки, что в совокупности с достаточно большими емкостями может сработать как  $\pi$ -фильтр с критической для должного функционирования схемы резонансной частотой. Подробно эти вопросы в теоретической и практической плоскостях рассмотрены в [10].

Разумеется, в рамках журнальной статьи невозможно дать детальное описание, и часть вопросов, например решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС), оказалась за ее рамками. Тем не менее надеюсь, что приведенная информация окажется полезной в выборе подходящего решения для ваших проектов. Больше сведений, в том числе полные данные по использованию и управлению по шине PMBus, особенностям разводки плат, а также указания по ЭМС, технологии монтажа и конфигурирования рассмотренных в данной статье преобразователей, представлено в их детальных спецификациях [4–9], а наиболее полной является спецификация [9]. Кроме того, дополнительную информацию можно найти на сайте компании Murata ([www.murata.com](http://www.murata.com)). При необходимости исчерпывающую консультацию по применению этих и сопутствующих продуктов компании нетрудно получить через службу технической поддержки Murata или непосредственно у ее авторизованного дилера. ■

## Литература

1. Рентюк В. Применение маломощных изолированных DC/DC-преобразователей серий NXE1 и NXJ1 компании Murata в решениях PoL с точки зрения функционально-стоимостного анализа // Компоненты и технологии. 2016. № 6.
2. Рентюк В. Новые возможности современных DC/DC-преобразователей: особенности принятия решения по выбору и типовые применения // Электрик. 2015. № 7–9.
3. Рентюк В. Новейшие мощные промышленные DC/DC-преобразователи компании Murata // Компоненты и технологии. 2017. № 3.
4. OKDx-T/20-W12-xxx-C, 20A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-20-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-20-w12.pdf)
5. OKDx-T/25-W12-xxx-C, 25A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-25-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-25-w12.pdf)
6. OKDx-T/40-W12-xxx-C, 25A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-40-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-40-w12.pdf)
7. OKDx-T/50-W12-xxx-C, 25A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-50-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-50-w12.pdf)
8. OKDx-T/60-W12-xxx-C, 25A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-60-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-60-w12.pdf)
9. OKDx-T/90-W12-xxx-C, 25A Digital PoL DC-DC Converter Series, Murata. [www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-90-w12.pdf](http://www.power.murata.com/datasheet/?data/power/okdx-t-90-w12.pdf)
10. Roberts S. DC/DC book of knowledge: Practical tips for the User. Second Edition. Recom, 2015.