

Цифровое управление

преобразованием напряжения — это уже реальность

Разработчики импульсных источников питания уделяют большое внимание внедрению цифровых технологий для управления преобразованием напряжения, что позволяет еще больше увеличить КПД и производительность, снизить количество компонентов, повысить технологичность производства и надежность. Построение силовых преобразователей, использующих частично или полностью цифровые методы управления, обусловлено развитием современных микроконтроллеров и процессоров, расширением их функциональных возможностей при постоянном снижении стоимости.

Виктор Жданкин

victor@prosoft.ru

Цифровые технологии в силовых преобразователях

Интегральные микросхемы для реализации цифрового управления преобразованием напряжения выпускают многие компании: Atmel (микроконтроллеры серии ATmega и AVR), Microchip (контроллеры цифровых сигналов серии dsPIC и серий PIC16–PIC18), Silicon Laboratories (цифровые силовые контроллеры Si825x), Texas Instruments (ИМС UCD9501), Primarion (ИМС серий PX35xx, PX75xx), Maxim (MAX8688), Zilker Labs и некоторые другие. По прогнозам аналитической компании iSuppli Corporation, общий доход от продажи контроллеров (Digital Controllers of Power) и устройств управления (Digital Power Managers) для реализации цифрового управления преобразованием напряжения и построения локальных сетей конфигурации, управления и мониторинга цифровых силовых преобразователей повысится к 2010 году до \$904 млн, что почти в 6 раз больше доходов 2007 года — \$153 млн [1].

Согласно недавнему исследованию аналитической компании Darnell Group, сегмент рынка источников питания, в которых будет использована какая-либо форма цифрового контура управления, как ожидается, будет расти со среднегодовым темпом около 45%, по крайней мере, в течение пяти лет. Рост сегмента рынка источников питания с цифровым контуром управления будет происходить почти в пять раз быстрее, чем всего рынка источников питания в целом. Прогнозируется, что к 2013 году рынок цифровых силовых преобразователей превысит 1,4 млрд устройств.

Оценивая рынок в перспективе, можно определить рост общемирового рынка модулей источников питания AC/DC и DC/DC со средней скоростью около 10% между 2008 и 2013 годами. Этот прогноз учитывает встроенные и внешние источники питания AC/DC наряду с DC/DC-преобразователями с гальванической изоляцией и без изоляции (point-of-load). Предполагаемое количество (возможность реализации 1,4 млрд модулей), тем не менее, вдвое меньше общего спроса, таким образом, доля цифрового

управления будет продолжать быстро возрастать и далее.

Непрерывный быстрый рост применения различных цифровых технологий в каскадах источников электропитания стал важнейшим фактором, определившим успех форума по применению цифровых технологий в силовых преобразователях, организованного компанией Darnell Group в сентябре 2008 года (Digital Power Forum'08 — DPF'08). Как всегда, этот форум собрал международную аудиторию, которая получила возможность ознакомиться с направлением цифрового управления преобразованием напряжения в индустрии источников питания, продемонстрировал соответствующую продукцию, а также разнообразие и обширную географию решений на ее основе. Многие европейские компании представили на DPF'08 информацию, связанную с преобразованием мощности, а также оборудование для решения принципиально важных задач и современные компоненты. Компании Cambridge Semiconductor, Eltek/Valere, Ericsson Power Modules, Infineon Technologies, Powervation, STMicroelectronics и TranSic предложили вниманию участников форума свое видение перспектив относительно эффективности преобразования энергии, надежности, конфигурируемости и новых материалов, таких как карбид кремния.

На конференции DPF'08 прозвучал ряд специализированных докладов, сфокусированных на цифровом управлении энергией и преобразовании напряжения в таких важных для многих предприятий приложениях, как центры обработки и хранения данных, телекоммуникационное и цифровое оборудование для связи. Две расширенные технические секции, посвященные реализации цифрового управления на системном уровне, были организованы в сотрудничестве с PMBus Organization (в 2004 году была предложена система построения локальной сети конфигурации, управления и мониторинга цифровых силовых DC/DC-преобразователей на основе последовательной шины PMBus).

В DPF'08 приняли участие многие профильные компании, которые проявляют большой интерес к цифровым технологиям управления преобразова-

нием энергии. Это Analog Devices, Coldwatt, Embedded Microprocessor Benchmarking Consortium, Emerson Network Power, Energy Star, Ericsson Power Modules, Fairchild Semiconductor, IBM, Infineon Technologies, Intel, International Rectifier, Lineage Power, Maxim, Microchip, National Semiconductor, NXP, Power-One, Primarion, STMicroelectronics, Texas Instruments и Zilker Labs.

Необходимо заметить, что первый форум (Digital Power Forum), посвященный применению цифровых технологий в силовых преобразователях, организованный компанией Darnell Group, состоялся в 2004 году. Шестая конференция DPF состоится в 2009 году и будет посвящена практически всем основным аспектам преобразования напряжения во встроенных системах, включая:

- оптимизацию эффективности использования энергии;
- планарные магнитные компоненты;
- методы расчета теплового режима;
- дискретные полупроводниковые устройства;
- управление преобразованием энергии;
- архитектуры управления преобразованием напряжения на уровне плат;
- архитектуры управления преобразованием напряжения на системном уровне;
- инструментальные средства и технологии для проектирования;
- разработку программного обеспечения и аппаратную реализацию;
- и другие важнейшие аспекты преобразования напряжения для встроенных систем.

Таким образом, на конференции 2009 года пройдет обсуждение всех проблем, с которыми сталкиваются проектировщики при внедрении цифровых технологий для управления преобразованием напряжения в электронных системах при организации управления и мониторинга для цифровых силовых преобразователей.

Способам построения преобразователей напряжения с цифровым управлением, сведениям о методах их реализации, основным проблемам и особенностям, возникающим при их проектировании, посвящено множество публикаций в российских и зарубежных журналах [2–16].

Далее в качестве примеров будут представлены несколько конкретных моделей источников питания компании TDK-Lambda, созданных с применением микроконтроллеров для реализации цифрового контура управления и других технических решений, способствующих значительному повышению их качества.

Источники питания AC/DC серии NV-Power с цифровым управлением

Первые модели источников питания с цифровым управлением, представленные TDK-Lambda весной 2008 года, — это конфигурируемые источники питания AC/DC серии NV-Power (рис. 1) с выходной пиковой мощностью 1450 Вт. Новые модули электропитания позволили компании удовлетворить возрастающий спрос на конфигурируемые источники



Рис. 1. Внешний вид источников питания AC/DC серии NV-Power с цифровым контуром управления преобразованием напряжения

питания высотой 1U с выходными мощностями выше 1000 Вт для радиовещательного, измерительного и медицинского оборудования, а также для ряда других применений, таких как автоматическое испытательное оборудование, промышленная автоматизация, маршрутизаторы и серверы, системы безопасности вычислительных сетей.

Новые блоки питания с цифровым управлением вобрала в себя много инновационных решений, например, новый интегрированный трансформатор, который обеспечивает небольшие габариты и повышенную эффективность. Цифровое управление обеспечивает возможность изготовления модулей по техническим требованиям заказчиков в соответствии с конкретными условиями применения (возможно изменение значения уровня ограничения тока нагрузки и параметров запуска). Усиленная электрическая изоляция между первичной и вторичной цепями выдерживает 4000 В (действующее значение), что позволяет применять эти источники питания в медицинском электрооборудовании.

Для осуществления управления стандартными процедурами преобразования напряжения в источниках питания серии NV-Power используется 8-разрядный микроконтроллер серии AVR AT90PWM2B фирмы Atmel, заменяющий комплект специализированных контроллеров, компараторов, операционных усилителей, таймеров, а также цифровые схемы и другие дискретные компоненты, используемые в менее интегрированных конструкциях. Это приводит к 50%-ому сокращению количества компонентов, что, в свою очередь, обеспечивает дополнительные 40% площади печатной платы для размещения силовых компонентов. При весьма высокой пиковой мощности микроконтроллера проектировщики систем могут реализовать значение удельной мощности до 19 Вт/дюйм³ в блоке высотой 1U с размерами основания 125×250 мм.

Источники питания серии NV-350 обеспечивают в нагрузке до 600 Вт при длительном режиме работы (750 Вт пиковой мощности в течение 10 секунд): в типовой фирменный каркас может быть установлено до шести сконфигурированных модулей. Многорезонансный метод переключения силовых транзисторов (Multi Resonant Topology — MRT), патентованная конструкция силового трансформатора и другие конструкторские решения позволяют значительно улучшить показатели электромагнитной совместимости (класс В по стандарту EN55022) и получить ток утечки на «землю» менее 300 мкА при входном напряжении 264 В и частоте питающей сети 63 Гц, что соответствует требованиям стандартов IEC/EN/UL 60601-1 к электрооборудованию для медицинской техники.

Ряд источников питания NV-750 обеспечивает в нагрузке до 1150 Вт при длительном режиме работы (1450 Вт пиковой мощности в течение 10 секунд), в типовой фирменный каркас можно установить до восьми сконфигурированных модулей этой серии. Особо необходимо отметить, что новый одноканальный модуль «С» с цифровым управлением имеет ширину трех слотов и доступен с номинальными напряжениями 12, 15 или 24 В, обеспечивая 450 Вт при длительном режиме работы и 600 Вт пиковой мощности в течение 10 секунд. Каждый отдельный модуль формирует сигналы состояния выходного напряжения, имеет вход для дистанционного включения/выключения, характеризуется низким значением тока утечки и низким уровнем кондуктивных и излучаемых помех (класс В по стандартам EN 55011/55022).

Имеющийся широкий набор выходных модулей и возможность их комбинирования дают большое разнообразие комбинаций выходных напряжений и токов. Используя on-line конфигуратор NV-Power (www.nv-power.com), заказчики могут создать свои собственные схемы. Эта сервисная программа проверяет конфигурацию и предлагает оптимальное решение. Все выходные каналы полностью изолированы и поддерживают режим холостого хода. Кроме того, серия NV-350 доступна с обратным охлаждающим воздушным потоком. Низкопрофильные выходные соединители позволяют использовать максимальный воздушный поток для обеспечения эффективного охлаждения.

В серии NV-Power доступны модели с номиналами выходного напряжениями от 3,2 до 64 В, а также выходы 5 В (2 А) и 12 В (1 А) для обеспечения дежурного режима. В серии NV-Power используется комплексная технология повышения эффективности (Multiple Efficiency Gain — MEG), обеспечивающая высокое значение КПД: до 90% в зависимости от конфигурации.

Повышение эффективности каждого из каскадов источника питания в итоге позволяет значительно повысить качество источников питания серии NV-Power.

Перечислим основные технические решения, способствующие значительному повышению показателей качества источников питания:

1. Мягкое переключение силовых транзисторов при нуле напряжения в выходном преобразователе позволяет применить в поме-

- хоподавляющих фильтрах малогабаритные индуктивные компоненты, которые имеют небольшие значения сопротивлений и, следовательно, меньшие потери.
- Использование в схеме активного корректора коэффициента мощности (ККМ) карбид-кремниевых диодов (SiC) значительно снижает коммутационные потери благодаря отсутствию потерь мощности из-за обратного тока восстановления диода. Только одно это обеспечивает повышение КПД на 1%.
 - Применение в структуре полумостового преобразователя многорезонансных эффектов для обеспечения режима переключения силовых транзисторов при нуле напряжения повышает КПД при изменении нагрузки от 30 до 100% и обеспечивает низкое взаимное влияние между каналами.
 - Использование синхронного выпрямления в выходном каскаде, при котором демпферный диод понижающего регулятора заменяется коммутируемыми MOSFET-транзисторами (рис. 2).

В источниках питания применяется цифровой контур управления.

Микроконтроллер AT90PWM2B обеспечивает: цифровую обработку сигналов для реализации частотно-импульсного управления и создания необходимых обратных связей в контурах управления; формирование сигнала управления аналоговой схемой ККМ и пусковым током; защиту от перегрева, перенапряжения, перегрузки по току. Подробнее схема цифрового контура управления на основе микроконтроллера AT90PWM2B представлена далее при описании источников питания AC/DC серии EFE-300/400.

Серия EFE источников питания AC/DC с цифровым контуром управления

Созданные с применением цифрового управления преобразованием напряжения источники питания AC/DC серии EFE компании TDK-Lambda отличаются высокой для изделий промышленного назначения удельной мощностью и эффективностью, а также повышенной надежностью. Первыми моделями данной серии, представленными компанией осенью 2008 года, стали 300-Вт EFE-300 и 400-Вт EFE-400 одноканальные источники питания, способные обеспечить в нагрузке пиковую мощность 133% от номинального значения мощности в течение 10 с и характеризующиеся высоким для своего класса значением КПД — до 90% (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид источников питания AC/DC серии EFE с цифровым контуром управления

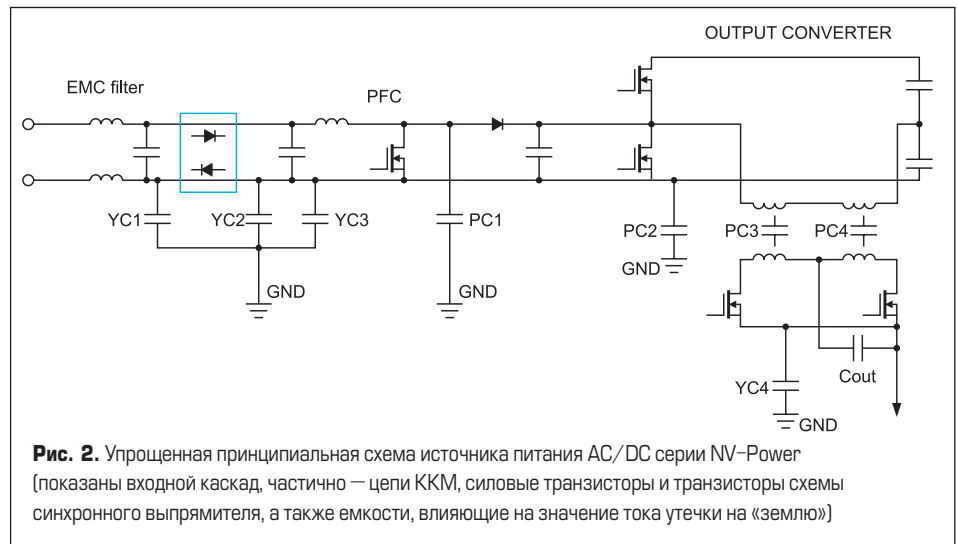


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема источника питания AC/DC серии NV-Power (показаны входной каскад, частично — цепи ККМ, силовые транзисторы и транзисторы схемы синхронного выпрямителя, а также емкости, влияющие на значение тока утечки на «землю»)

Цифровое управление преобразованием напряжения и вспомогательные функции осуществляются 8-битовым микроконтроллером AT90PWM2 серии AVR (компания Atmel), что позволило на 25% сократить количество компонентов, уменьшить площадь конструкции на 45%, а вес — на 56% по сравнению с недавно анонсированными конкурирующими изделиями. Значение удельной мощности (до 1350 Вт/дм³) достигается при пиковой нагрузке, а значение удельной мощности 1018 Вт/дм³ — при номинальной нагрузке.

Блок-схема источника питания AC/DC серии EFE-300 приведена на рис. 4.

Источники питания серии EFE-300/400 выполнены на двухтактной полумостовой схеме с резонансным переключением. Схема содержит силовые транзисторные ключи VT2 и VT3. Конденсаторы C2 и C3 образуют делитель напряжения первичного источника E. Транзисторные ключи VT2 и VT3 поочередно открываются и закрываются сигналами управления, поступающими через драйвер (обеспечивает зарядку входной емкости силовых транзисторов MOSFET) от микроконтроллера AT90PWM2B. Для обеспечения режима

резонансного переключения применяются антипараллельные диоды и выходные емкости силовых транзисторов, а индуктивность рассеяния и индуктивность намагничивания силового трансформатора используются как резонансная индуктивность последовательного резонансного контура. При этом через транзисторные ключи протекают резонансные токи, что позволяет формировать практически идеальные траектории переключения транзисторов. Переключение транзисторов осуществляется практически при нуле напряжения с плавным изменением тока, отсутствием выбросов напряжений и паразитных СВЧ-колебаний, что дает возможность снизить коммутационные потери, повысить качество и надежность.

8-разрядный микроконтроллер серии AVR, используемый в схеме для реализации управления, имеет передовую RISC-архитектуру, которая обеспечивает во много раз более высокое быстродействие, чем традиционная CISC-архитектура, а также флэш-память объемом 8 кбайт, генераторы, 11-канальный 10-разрядный АЦП с двумя дифференциальными входными каскадами с программируемым коэф-

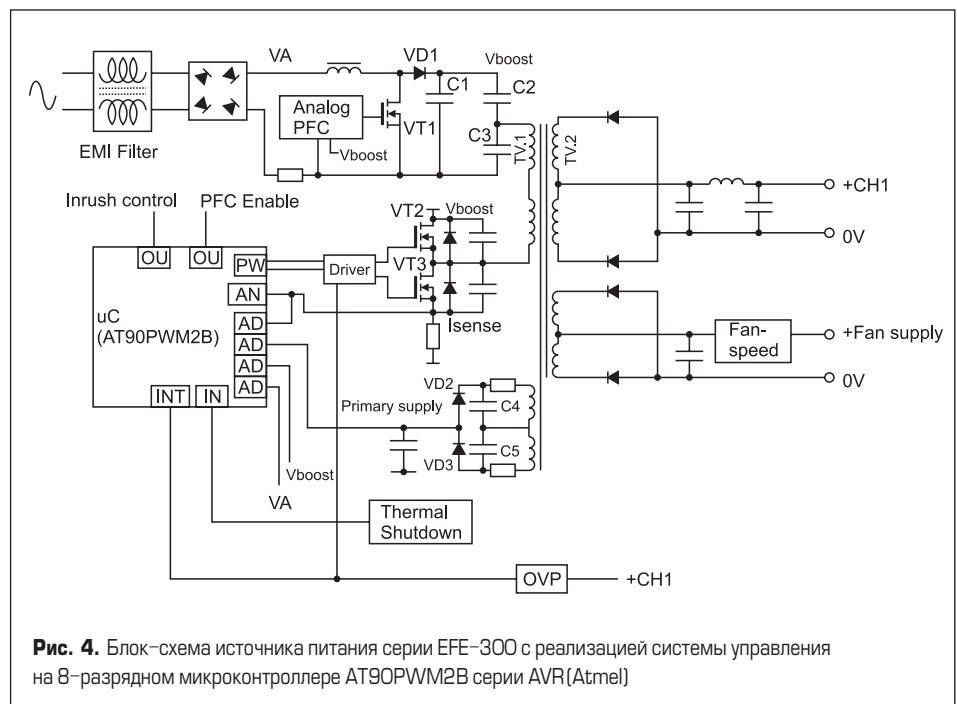


Рис. 4. Блок-схема источника питания серии EFE-300 с реализацией системы управления на 8-разрядном микроконтроллере AT90PWM2B серии AVR (Atmel)

фициентом усиления, ШИМ-контроллер, два таймера-счетчика, аналоговые компараторы с матрицей резисторов для подстройки напряжения, 4 входа внешних прерываний, различные интерфейсы (последовательный порт SPI, программируемый последовательный USART). Быстродействие микроконтроллера — до 1 MIPS. Объединяя 8-разрядный RISC-процессор со встроенной программируемой флэш-памятью на монолитном кристалле, AT90PWM2B/3B является мощным микроконтроллером, позволяющим строить гибкие и рентабельные решения для многих встроенных применений. Микроконтроллеры AT90PMB2/3B серии AVR поддерживаются полным комплектом программ и системными средствами разработки, включая компиляторы языка C, макроассемблер, отладчик/имитатор программ, внутрисхемные эмуляторы и оценочные комплекты.

Гарвардская архитектура AVR реализует полное логическое и физическое разделение не только адресного пространства, но и информационных шин для обращения к ROM и SRAM. Такое построение уже ближе к структуре DSP и позволяет значительно повысить быстродействие. Использование одноуровневого конвейера также заметно сокращает цикл «выборка/исполнение команды».

Наличие обширного набора аналоговых компонентов и цифровых периферийных устройств, а также встроенного программируемого ЭППЗУ и флэш-памяти значительно повышает гибкость, поэтому микроконтроллеры серии AVR можно использовать для реализации цифрового контура управления в преобразователях напряжения.

Со вторичной обмотки преобразователя через трансформатор и выпрямительные диоды VD2, VD3 на один из каналов АЦП микроконтроллера поступает сигнал о выходном напряжении, а на другой канал АЦП и вход встроенного компаратора — сигнал с токоизмерительного резистора, то есть реализуется метод регулирования с дополнительной обратной связью по току дросселя (ДОСТД). Хорошо известно, что применение режима регулирования с ДОСТД обеспечивает параметрическую компенсацию отклонений входного напряжения, ограничение тока в каждом рабочем цикле, а также собственную устойчивость системы. Упрощается частотная коррекция всего контура обратной связи и уменьшается время реакции контура, как при малых, так и при больших изменениях тока нагрузки [17].

Сигнал от температурного датчика поступает на один из входов внешнего прерывания, сигнал о перенапряжении — на вход прерывания INT2 (6-й канал АЦП) и на драйверы транзисторов MOSFET. Для включения ШИМ-модулятора ККМ, являющегося компонентом схемы аналогового ККМ, предназначен один из выходов микроконтроллера PSCOUT. Микроконтроллер также осуществляет управление плавным запуском источника питания. На один из каналов АЦП подается сигнал о напряжении сети (VAC).

Микроконтроллер позволяет значительно упростить схему управления цепями источника питания на первичной стороне транс-

форматора, что приводит к уменьшению количества применяемых компонентов и повышению эффективности без снижения показателей стабилизации.

Кроме того, отпала необходимость в применении оптронных развязок сигналов, которые нежелательны в конструкциях источников питания, рассчитанных на длительные сроки эксплуатации.

Конструкция источников питания серии EFE-300/400 построена на множестве инновационных решений. В частности, это оригинальная конструкция трансформатора: общий ферритовый сердечник с чередованием слоев первичной и вторичной обмоток. Это приводит к образованию сильной магнитной связи и, как следствие, к росту КПД трансформатора, что, в свою очередь, повышает общий КПД источника примерно на 1%. Применение карбид-кремниевых диодов в корректоре КМ увеличивает значение КПД еще на 1% благодаря отсутствию потерь мощности из-за обратного тока восстановления диода. Цифровое управление позволяет оптимизировать такие технические характеристики источника питания, как ограничение тока нагрузки и параметры запуска.

Многие из особенностей конструкции источника питания серии EFE с цифровым управлением непосредственно повышают надежность. Например, наличие точного управления при аварийных ситуациях предотвращает перенапряжение устройства благодаря оригинальным алгоритмам. Кроме того, достигается лучшая устойчивость к воздействию помех по сравнению с конструкциями с аналоговой обратной связью, а существенное уменьшение числа компонентов позволяет оптимизировать их размещение для улучшения теплового режима источника питания.

Доступны модели серии EFE-300 с выходными напряжениями 12 В (25 А) или 24 В (12,5 А), обеспечивающие в нагрузке номинальную мощность 300 Вт (пиковая мощность 400 Вт в течение 10 с), и модели серии EFE-400 с выходными напряжениями 12В (33,3 А) или 24 В (16,7 А), обеспечивающие в нагрузке номинальную мощность 400 Вт (пиковая мощность 530 Вт в течение 10 с). Все модули могут быть запрограммированы при производстве для применения в приложениях с нестандартным напряжением питания. Модули работают от сети переменного тока в диапазоне напряжения от 90 до 264 В (изменение частоты сети 45–63 Гц, возможна работа при частоте 440 Гц с уменьшенным КМ) или от сети постоянного тока в диапазоне напряжения от 120 до 350 В; устройства снабжены двумя предохранителями во входной цепи, а также имеют дополнительный канал 12 В (0,25 А) для питания вентилятора. Активный корректор коэффициента мощности обеспечивает соответствие требованиям стандарта EN 61000-3-2 к гармоническим составляющим входного тока. Другие конструктивные решения, улучшающие показатели ЭМС, такие, например, как применение карбид-кремниевых диодов, позволяют гарантировать со значительным запасом электромагнитную совместимость по нормам класса В.

Источники питания серии EFE соответствуют высоким экологическим требованиям благодаря небольшому потреблению энергии при производстве и эксплуатации, применению меньшего количества компонентов, снижению весу. Эти источники питания имеют увеличенный срок службы.

Модули EFE доступны в корпусе и в открытом исполнении. Применение компактных соединителей позволяет максимально увеличить воздушный поток для повышения эффективности охлаждения. В моделях с установленными вентиляторами осуществляется изменение скорости вращения вентилятора в зависимости от тока нагрузки: осуществляется линейное управление, принципиальное преимущество которого по сравнению с другими методами — это отсутствие помех.

Небольшая площадь и высота 1U (EFE-300 имеет габаритные размеры 127×76×34 мм, а EFE-400 — 152×76×34 мм) позволяют применять источники питания серии EFE в конструкциях с ограниченными объемами, что обеспечивает меньшее тепловыделение и расширяет их функциональные возможности.

Данная серия рекомендована к применению в радиовещательном, измерительном, промышленном оборудовании, системах автоматизации, маршрутизаторах, серверах и системах безопасности.

Все модели серии EFE компании TDK-Lambda отвечают стандартам электробезопасности IEC/EN/UL/CSA 60950-1, требованиям Европейских Директив (CE) и стандартам IEC/EN 61010-1 для лабораторного и технологического оборудования. Также нормируется длительная доза фликера согласно требованиям стандарта EN 61000-3-3. Известно, что колебания светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники, воспринимаются человеком, и при скрытых и явных формах эпилепсии воздействие колебаний светового потока вызывает эпилептический припадок, приводящий к полной потере работоспособности. Таким образом, явление фликера надо рассматривать как вредное и даже опасное для здоровья человека [18]. Основными причинами появления колебаний напряжения являются ненулевое внутреннее сопротивление самой электрической сети и изменения потребляемого тока нагрузок, подключенных к ней. Основой для оценки эмиссии фликера считается форма кривой изменения напряжения на зажимах испытуемого технического средства при условии питания его от источника напряжения с нормированными параметрами, в частности стабильности выходного напряжения и определенного значения выходного сопротивления.

Модули серии EFE-300M (рис. 5) предназначены для применений в медицинском электрооборудовании и соответствуют требованиям международных стандартов UL 60601-1, EN 60601-1 к изделиям медицинской техники. Они имеют усиленную изоляцию между первичной и вторичной цепью, выдерживающую испытательное напряжение 4000 В (действующее значение), ток утечки на «землю» —

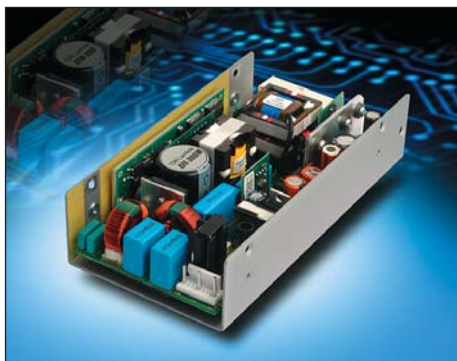


Рис. 5. Источник питания AC/DC EFE-300M с цифровым управлением преобразованием напряжения для применений в медицинском электрооборудовании

менее 300 мкА. Модули серии EFE-300M можно применять в медицинских изделиях типа В (изделия без рабочей части, например, лазерные лечебные системы, компьютерные системы) и ВF (изделия с изолированной рабочей частью типа F-floating, находящиеся в намеренном физическом контакте с пациентом, например, ультразвуковые установки, электрокардиографы и операционные столы).

Соединение транзисторов FET по схеме «ИЛИ» обеспечивает параллельное соединение модулей для (N+1)-резервирования без включения дополнительного диода. Суммарная нестабильность выходного напряжения — менее 4%. Так как микроконтроллер используется для прогнозирования выходного напряжения цифровым способом, значения нестабильности по току и напряжению могут быть изменены или точно настроены, что особенно полезно при параллельном соединении.

Заключение

Применение цифровых технологий для построения силовых преобразователей позволяет значительно увеличить эффективность преобразования напряжения, сократить количество компонентов, повысить надежность источников питания, повысить гибкость их использования и легко адаптировать к конкретным усло-

виям. Появление на рынке разнообразных программируемых микроконтроллеров с интегрированными функциями обработки сигналов и специализированными устройствами ввода/вывода, а также постоянное снижение стоимости этих контроллеров дают возможность проектировщикам систем электропитания выбрать оптимальное решение для создания силового преобразователя с цифровым контуром управления или организовать взаимодействие между управляющим контроллером и DC/DC-преобразователями с цифровым управлением по цифровой шине стандарта PMBus (Power Management Bus).

Но надо помнить, что создать надежный и эффективный преобразователь напряжения можно только на основе обширных теоретических знаний и практического опыта, накопленного за многие годы в процессе разработки высокочастотных преобразователей напряжения отечественными и зарубежными специалистами, уделяя особое внимание конструированию источников электропитания.

Появление современных импульсных источников питания с микропроцессорным управлением зарубежной и отечественной [16] разработки демонстрирует, что цифровые технологии в силовых преобразователях напряжения стали объективной реальностью.

Литература

1. Vukicevic M. Digitally-Controlled Power Semi Market to Approach \$1 Billion by 2001 // *Power System Design*. 2008. March.
2. Мелешин В., Овчинников Д. Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных выпрямителей // *Силовая электроника*. 2005. № 4.
3. Гладштейн М. Новые интегральные компоненты для импульсных силовых преобразователей // *Электронные компоненты*. 2006. № 6.
4. Микроконтроллеры и управление импульсными источниками питания. Внедрение полностью цифрового контура управления // *CHIP NEWS*. 2007. № 7.
5. Звонарев Е. Контроллеры Texas Instruments для цифровых источников питания // *Электронные компоненты*. 2007. № 9.
6. Крис Б. Цифровое управление преобразованием напряжения // *Электронные компоненты*. 2007. № 11.
7. Староверов К. Микросхемы Digital Power для построения каскадов электропитания с цифровым управлением. Часть 1 // *Электронные компоненты*. 2008. № 9.
8. Староверов К. Микросхемы Digital Power для построения каскадов электропитания с цифровым управлением. Часть 2 // *Электронные компоненты*. 2008. № 10.
9. Дювинеидж Ф. Использование микроконтроллеров для обеспечения эффективного управления большими компьютерными системами // *Электронные компоненты*. 2007. № 9.
10. Vukicevic M. Energy Crisis Not a Problem for Digital Control of Power // *Power Systems Design Europe*. 2006.
11. Quinn C. Driving intelligent power conversion // *Electronics Weekly*. 2008. No. 2359 (5–11 November).
12. Pechi L. Digital Power Conversion Opens the Door to Digital Power Management // *Power Electronics Europe*. Issue 7. November 2006.
13. Le Fèvre P. Times New Roman From Digital Confusion to Digital Conversion // *Power Electronics Europe*. Issue 7. November 2006.
14. Le Fèvre P. Digital Techniques for Power Modules // *EPN*. 2008. № 11.
15. Baoxing Chen. Microtransformer Isolation Benefits Digital Control // *Power Electronics Technology for Engineers, Designers and Integrators*. 2008. October. Vol. 34. No. 10.
16. Владимиров Е., Ланцов В. Импульсные источники питания большой мощности с микропроцессорным управлением // *Современная электроника*. 2009. № 1.
17. Гудиноф Ф. Интегральные схемы управления импульсными источниками питания // *Электроника*. 1989. № 23.
18. Тухас В. А., Прожидаев С. В., Эйнтроп С. А. Измерение фликера и гармонических составляющих тока // *Технологии ЭМС*. 2002. № 3.