

AC/DC-конвертеры Vicor с коррекцией коэффициента мощности

Владимир БЕЛОТУРОВ

Дмитрий ИВАНОВ, к. т. н.
di@efo.ru

Игорь КРИВЧЕНКО, к. т. н.
ik@efo.ru

Продолжаем цикл публикаций, посвященных разработке систем вторичного электропитания на базе модулей американской компании Vicor. В четвертой статье рассмотрены модули семейства VI-NAH, предназначенные для построения AC/DC-конвертеров с коэффициентом мощности, близким к 1.

Введение

В предыдущих публикациях цикла, посвященного продукции американской компании Vicor, мы рассказали о DC/DC-конвертерах Vicor первого [1] и второго [2] поколений, а также об AC/DC-модулях семейств VI-AIM, VI-ARM и VI-FARM [3], которые служат для сопряжения DC/DC-конвертеров Vicor с входной сетью переменного тока.

DC/DC-конвертеры Vicor являются функционально законченными импульсными стабилизированными преобразователями напряжения с гальваническим разделением входных и выходных цепей. Конструктивно

конвертеры представляют собой модули (рис. 1) одного из трех типоразмеров: Brick («кирпич»), Half Brick («полкирпича») или Quarter Brick («четверть кирпича»). При этом электрические параметры модулей, выполненных в однотипных корпусах, могут очень сильно отличаться друг от друга. Например, диапазон номинальной выходной мощности конвертеров семейства Maxi, выпускаемых в корпусе Brick, — от 150 до 600 Вт, допустимые пределы изменения входного напряжения — от 18–36 до 250–425 В, а диапазон номинального выходного напряжения — от 2 до 54 В [2]. Допускается параллельная работа нескольких модулей на общую нагрузку в режиме Power Sharing, что позволя-

ет построить из таких модулей импульсный преобразователь напряжения с выходной мощностью до нескольких киловатт.

Входные AC/DC-модули AIM, ARM и FARM в комбинации с DC/DC-конвертерами Vicor служат для построения сетевых источников питания с выходной мощностью от 200 до 1500 Вт [3]. Модули AIM предназначены для работы с конвертерами только первого поколения. Модули ARM и FARM (рис. 2) совместимы с конвертерами серий VI-26x, VI-J6x [1] и V300 [2], то есть они могут работать со всеми конвертерами Vicor, как первого, так и второго поколения, номинальное входное напряжение которых равно 300 В.

В составе сетевого источника питания входные AC/DC-модули выполняют следующие функции: подавление электромагнитных помех по цепи питания, выпрямление входного напряжения, защиту от выбросов входного напряжения при переходных процессах в сети и ограничение пускового тока при включении источника питания. Исключением является модуль ARM, у которого нет встроенного фильтра.

Ценным потребительским качеством AC/DC-модулей AIM, ARM и FARM считается их универсальность по отношению к питающей сети. Модули семейства AIM предназначены для подключения к сети с действующим значением напряжения от 85 до 264 В и частотой от 47 до 440 Гц. Все модули семейств ARM и FARM могут работать от сети с действующим напряжением от 90 до 132 или от 180 до 264 В и частотой от 47 до 63 Гц, а модули температурных классов «Т» и «Н» — до 880 Гц. Таким образом, модули AIM, ARM и FARM соответствуют требованиям и американских, и европейских, и японских стандартов к параметрам бытовой сети переменного тока.

Из недостатков модулей AIM, ARM и FARM следует отметить низкий коэффициент мощности, типовое значение которого



Рис. 1. DC/DC-конвертеры Vicor второго поколения: а) «кирпич», б) «полкирпича», в) «четверть кирпича»

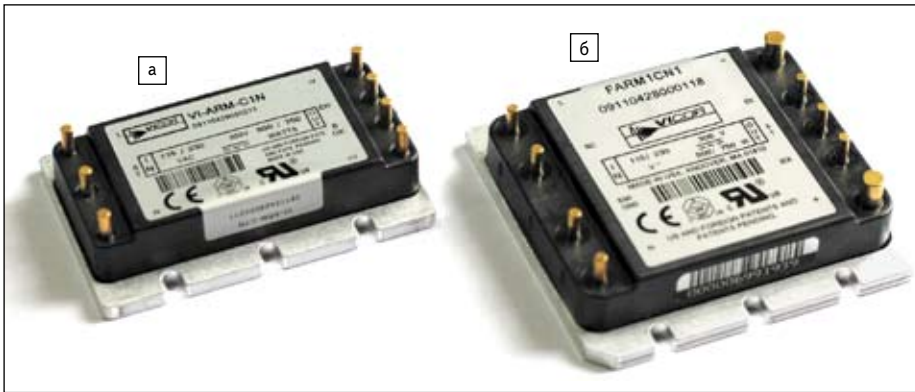


Рис. 2. Входные AC/DC-модули: а) VI-ARM, б) VI-FARM

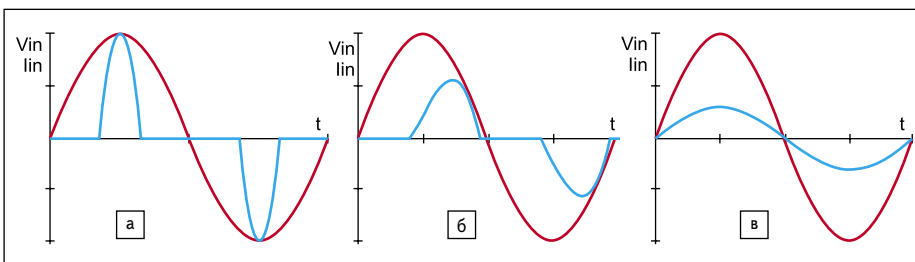


Рис. 3. Характер зависимости входного напряжения V_{in} (кривая красного цвета) и входного тока I_{in} (кривая синего цвета) AC/DC-преобразователя от времени t : а) без коррекции коэффициента мощности; б) с пассивной коррекцией коэффициента мощности; в) с активной коррекцией коэффициента мощности

равно 0,6 [3], и высокое содержание гармоник во входном токе. В принципе эти недостатки есть у всех AC/DC-преобразователей, в которых используется выпрямитель с емкостным сглаживающим фильтром на выходе. Для сети переменного тока такое устройство является нежелательной нагрузкой, поскольку при синусоидальном напряжении в сети форма потребляемого тока очень сильно отличается от синусоиды (рис. 3а). Импульсный входной ток протекает в короткие промежутки времени, в течение которых идет подзарядка сглаживающего конденсатора. В спектральном составе входного тока кроме полезной активной составляющей, совпадающей по частоте и фазе с входным напряжением, присутствуют реактивная составляющая основной частоты, а также высшие гармоники. Реактивная составляющая и высшие гармоники входного тока абсолютно бесполезны с точки зрения передачи электрической энергии от сети переменного тока к потребителю (в нашем случае потреби-

лем энергии является нагрузка источника питания). В то же время эти составляющие потребляемого тока очень вредны для питающей сети, так как они приводят к дополнительным потерям энергии, которая выделяется в виде тепла в электрических проводах, и вносят в сеть частотные искажения.

Для повышения коэффициента мощности, предельное значение которого равно 1, используются различные методы пассивной и активной коррекции коэффициента мощности (Power Factor Correction, PFC). Пассивная коррекция заключается в компенсации реактивной составляющей подключаемой к сети нагрузки с помощью дополнительных внешних пассивных компонентов. Например, для компенсации емкостной составляющей нагрузки последовательно с нагрузкой можно включить дроссель. Этот метод отличается простотой и относительно низкой стоимостью, но имеет ряд серьезных недостатков. Во-первых, пассивная коррекция, хотя и улучшает форму потре-

бляемого от сети тока, не решает проблему полностью, поскольку форма тока отличается от синусоидальной (рис. 3б) и коэффициент мощности возрастает незначительно (с 0,6 до 0,7–0,75). Во-вторых, за простоту приходится платить увеличением размеров и веса источника питания, поскольку для коррекции коэффициента мощности на низкой частоте требуются крупногабаритные и тяжелые пассивные компоненты. В-третьих, качество коррекции изменяется в зависимости от тока нагрузки, а также есть другие недостатки, подробно рассмотренные в литературе по силовой электронике. Активные методы PFC значительно сложнее и дороже, чем пассивные, но позволяют получить более хорошие результаты [4].

Эта статья посвящена AC/DC-модулям компании Vicor, в которых используется активная коррекция коэффициента мощности. Входной ток этих модулей повторяет форму входного напряжения и совпадает с ним по фазе (рис. 3в); значение коэффициента мощности превышает 0,99.

Рассмотренные в статье устройства отвечают требованиям международного стандарта EN 61000-3-2, устанавливающего допустимые пределы интенсивности высших (со второй по сороковую) гармоник входного тока для источников вторичного электропитания, а также других потребителей с номинальной мощностью выше 75 Вт, подключаемых к общей сети переменного тока. Основные положения стандарта EN 61000-3-2 включены в национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51317.3.2-2006 [5].

Входные AC/DC-модули VI-HAM с активной коррекцией коэффициента мощности

Модули HAM (Harmonic Attenuator Module) — это универсальные входные модули, предназначенные для сопряжения DC/DC-конвертеров Vicor с сетью переменного тока с действующим значением напряжения от 85 до 264 В и частотой от 47 до 63 Гц. Последовательное включение трех модулей Vicor, а именно сетевого фильтра (Vicor Part Number 30205) [6], модуля HAM и одного или нескольких DC/DC-конвертеров (рис. 4), позволяет построить AC/DC-конвертер с высокой плотностью конвертируемой мощности и коэффициентом мощности, близким к 1. При напряжении в сети 115 или 230 В AC коэф-

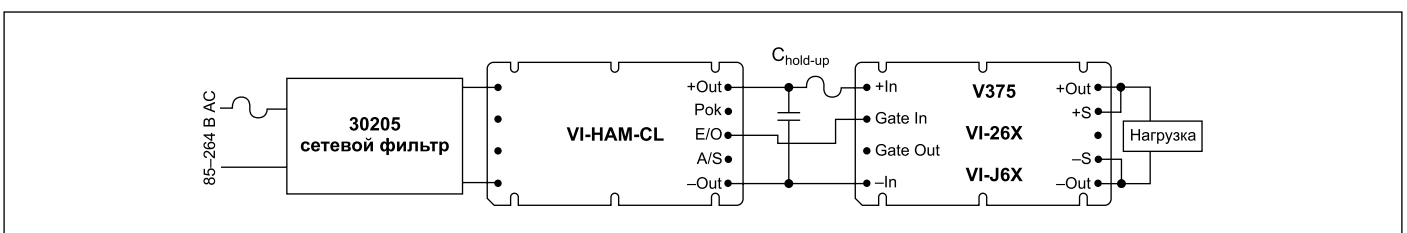


Рис. 4. Модуль VI-HAM в составе AC/DC-конвертера



Рис. 5. Модуль VI-HAM

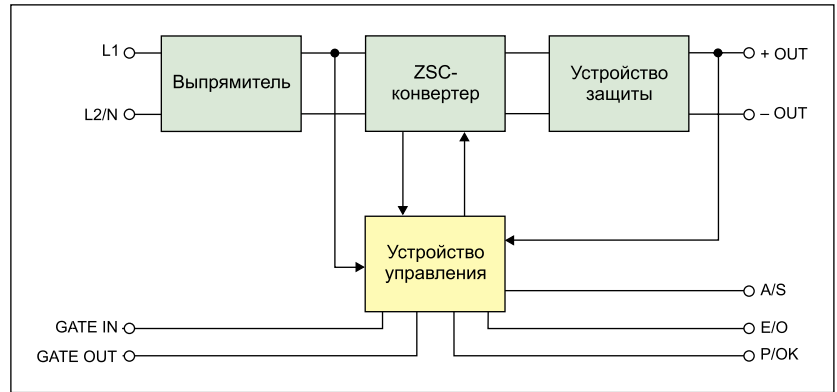


Рис. 6. Функциональная схема модуля VI-HAM

коэффициент мощности такого конвертера превышает 0,99 при изменении нагрузки в пределах от 50 до 100% от номинального значения.

Полная принципиальная схема AC/DC-конвертера кроме модулей Vicor содержит выходной конденсатор модуля HAM и еще несколько пассивных компонентов, о которых будет сказано ниже. Внешний конденсатор $C_{\text{hold-up}}$ (рис. 4), емкость которого зависит от конвертируемой мощности, предназначен для сглаживания пульсаций выходного напряжения модуля HAM, а также для удержания напряжения на входе оконечного DC/DC-конвертера в его рабочих пределах при кратковременных «провалах» напряжения в питающей сети. В дальнейшем будем называть его удерживающим (hold-up) конденсатором, как это принято в англоязычной литературе по электротехнике.

Модули HAM выпускаются в корпусе Brick с габаритными размерами 117×61×12,7 мм и массой 170 г; внешне (рис. 5) они выглядят точно так же, как DC/DC-конвертеры Vicor семейства VI-200.

Основные параметры модулей HAM приведены в таблице 1. Модули VI-HAM и VE-HAM одного и того же температурного класса отличаются друг от друга только тем, что модули VE-HAM соответствуют требованиям директивы RoHS, которая запрещает применение в электронных компонентах свинца и ряда других вредных химических элементов.

В состав семейства VI-HAM входят две серии модулей: VI-HAM-xM и VI-HAM-xL, которые отличаются значениями некоторых электрических параметров (табл. 1). Модули серии VI-HAM-xL имеют более высокое выходное напряжение при низких (приблизительно до 160 В AC) входных напряжениях и более высокую номинальную мощность по сравнению с модулями серии VI-HAM-xM. Из-за этих различий только модули серии VI-HAM-xL совместимы с DC/DC-конвертерами Vicor серии V375. Модули серии VI-HAM-xM имеют более ограниченное применение: они рассчитаны на работу с DC/DC-конвертерами серий VI-26x, VI-J6x, но с конвертерами серии V375 несовместимы.

Упрощенная функциональная схема модуля HAM приведена на рис. 6. В структуру модуля входят двухполупериодный выпрямитель, ZCS-конвертер — высокочастотный импульсный повышающий преобразователь напряжения с топологией ZSC (Zero Current Switching) [1], устройство защиты, выполняющее функции ограничения пускового тока и защиты выхода модуля от короткого замыкания, и устройство, которое управляет ZCS-конвертером и вырабатывает логические сигналы Enable Output (E/O) и Power OK (P/OK). На вывод A/S модуля подается вспомогательное напряжение с выхода встроенного маломощного источника напряжения, параметры которого приведены в таблице 1. Выводы GATE IN и GATE OUT у модулей VI-HAM-xM и VI-HAM-xL не ис-

пользуются. Пользователь не должен соединять эти выводы с какими-либо внешними электрическими цепями.

Выводы L1 и L2/N подключаются к сети переменного тока. Входное напряжение преобразуется двухполупериодным выпрямителем, и затем выпрямленное, но не сглаженное напряжение поступает на вход ZSC-конвертера, рабочая частота которого задается устройством управления. ZSC-конвертер стабилизирует свое выходное напряжение на таком уровне, чтобы оно всегда было больше амплитуды входного напряжения, тем самым заставляя средний входной ток модуля HAM повторять форму и фазу питающего напряжения.

Закон изменения выходного напряжения модуля серии VI-HAM-xL представлен на рис. 7. Для модуля серии VI-HAM-xM график имеет такой же характер, но отличается значением выходного напряжения на горизонтальном участке (260 В) и значением входного напряжения в точке излома (приблизительно 152 В). Таким образом, если действующее значение входного напряжения модуля VI-HAM-xL лежит в пределах от 85 до 180 В, то встроенный ZSC-конвертер поддерживает на выходе модуля напряжение 280 В. При изменении действующего значения входного напряжения в пределах от 180 до 265 В выходное напряжение модуля линейно изменяется, в результате чего поддерживается постоянная разность между выходным напряжением и амплитудным значением входного напряжения и обеспечивается высокое качество коррекции коэффициента полезного действия модуля.

Логический сигнал Enable Output (E/O), схема формирования которого приведена на рис. 8а, служит для запрета преждевременного запуска DC/DC-конвертера (рис. 4) при включении источника питания. До тех пор пока удерживающий конденсатор заряжается до напряжения, соответствующего напряжению питающей сети (рис. 7), на выходе E/O модуля HAM формируется логический сигнал низкого уровня относительно шины -OUT. Для того чтобы запретить самопроизвольное включение/выключение

Таблица 1. Параметры и эксплуатационные характеристики модулей VI-HAM/VE-HAM

Параметр	VI-HAM-xM	VI-HAM-xL
Совместимость с DC/DC-конвертерами Vicor	VI-26x, VI-J6x	V375, VI-26x, VI-J6x
Действующее значение входного напряжения $U_{\text{вх}}$, В	85–264	
Частота входного напряжения, Гц	47–63	
Выходное напряжение (при $U_{\text{вх}} = 115$ В), В	260	280
Выходное напряжение (при $U_{\text{вх}} = 230$ В), В	365	
Номинальная выходная мощность (при $U_{\text{вх}} > 110$ В), Вт	600	675
Номинальная выходная мощность (при $U_{\text{вх}} = 85$ В), Вт	400	
Коэффициент полезного действия, %	90–94	
Коэффициент мощности	Не менее 0,99	
Коэффициент нелинейных искажений (THD), %	Не более 8,5	
Максимальный пусковой ток, А • при $U_{\text{вх}} = 115$ В • при $U_{\text{вх}} = 230$ В	13 20	
Емкость выходного конденсатора $C_{\text{hold-up}}$, мкФ	500–3000	
Размах напряжения пульсаций (при $C_{\text{hold-up}} = 1000$ мкФ и номинальной нагрузке), В	Не более 10	
Напряжение на выходе A/S, В	19–23	
Максимальный ток нагрузки по выводу A/S, мА	3	
Изоляция между входными и выходными выводами	Нет	
Электрическая прочность изоляции входных и выходных выводов от основания модуля (rms), В	1500	
Защита выхода +OUT от короткого замыкания	Да	
Рабочий температурный диапазон, °C: • класс «E» • класс «C» • класс «I» • класс «M»	–10...+85 –25...+85 –40...+85 –55...+85	

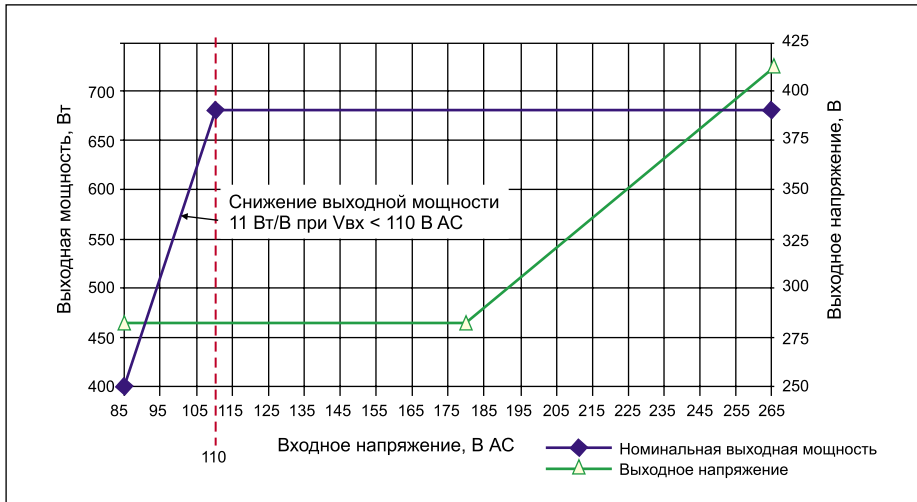


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения и номинальной выходной мощности модуля VI-HAM-xL от действующего значения входного напряжения

DC/DC-конвертера, необходимо выход E/O модуля HAM соединить с управляющим входом РС конвертера серии V375 либо с входом GATE IN конвертера серии VI-26х или VI-16х. Когда закончится переходный процесс на выходе +OUT модуля HAM, внутренняя связь (через MOSFET-транзистор, см. рис. 8а) между выходами E/O и -OUT разрывается, что является разрешающим сигналом для запуска DC/DC-конвертера.

При отключении источника питания от сети или аварийном пропадании сетевого напряжения запрещающий сигнал на выходе E/O формируется в тот момент, когда выходное напряжение модуля упадет ниже порогового уровня, который у модулей серии VI-HAM-xL равен 250 В, а у модулей серии VI-HAM-xM — 195 В. Для того чтобы после выключения источника питания удерживающий конденсатор полностью разрядился, параллельно конденсатору рекомендуется подключить резистор с номинальной мощностью 2 Вт и сопротивлением из расчета 100 кОм на каждую 1000 мкФ емкости конденсатора.

В том случае, когда нагрузка подключается не к выходам оконечного DC/DC-конвертера, а непосредственно к выходам модуля HAM, запрещается подключать нагрузку к модулю до тех пор, пока удерживающий конденсатор полностью не зарядится. Об окончании процесса заряда можно судить по состоянию выхода E/O модуля HAM.

Логический сигнал Power OK (P/OK) (рис. 8б) служит для индикации состояния модуля HAM и заблаговременной сигнализации об отключении модуля HAM от питающей сети. Активный (низкий) уровень этого сигнала устанавливается через 20–25 мс после того, как сбрасывается запрещающий сигнал низкого уровня на выходе E/O. Этого времени достаточно для того, чтобы выходной DC/DC-конвертер запустился и вышел на рабочий режим. Сброс сигнала P/OK

(MOSFET-транзистор переходит в закрытое состояние, рис. 8б) происходит тогда, когда выходное напряжение модуля HAM падает ниже установленного порога, типовое значение которого равно 270 В для модулей серии VI-HAM-xL и 230 В для модулей серии VI-HAM-xM. Тем самым модуль HAM сигнализирует о прекращении поступления энергии из питающей сети и своей неспособности отдавать выходному DC/DC-конвертеру требуемую мощность. Благодаря тому что пороги срабатывания логических элементов, изображенных на рис. 8а и б, разнесены не менее чем на 20 В, сброс активного сигнала P/OK всегда происходит раньше того момента, когда DC/DC-конвертер будет выключен с помощью логического сигнала низкого уровня, формируемого на выходе E/O.

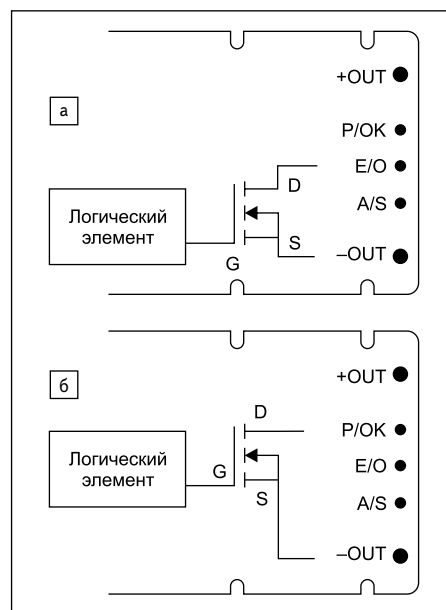


Рис. 8. Схемы формирования выходных логических сигналов модуля VI-HAM: а) Enable Output; б) Power OK

Следует всегда помнить о том, что сигнал P/OK «привязан» к шине -OUT модуля HAM, поэтому при использовании этого сигнала для удаленного мониторинга состояния модуля HAM в качестве входного сигнала какого-либо устройства с другим потенциалом общей шины необходимо дополнительное устройство гальванической развязки, например оптрон. Для питания первичной цепи оптрона можно использовать вспомогательный выход A/S, напряжение на котором (относительно шины -OUT модуля HAM) лежит в пределах от 19 до 23 В (рис. 9). Максимальный допустимый ток нагрузки, подключаемой к выходу A/S, равен 3 мА. Перегрузка или короткое замыкание выхода A/S ведет к повреждению модуля HAM.

Выводы GATE IN и GATE OUT (рис. 4–6), о назначении которых будет сказано ниже, у модулей VI-HAM-xM и VI-HAM-xL не используются. Не допускается соединение этих выводов с какими-либо внешними электрическими цепями.

Встроенное устройство защиты (рис. 6) служит для ограничения пускового тока на уровне, приведенном в таблице 1, а также защиты модуля HAM от перегрева, короткого замыкания и перенапряжения на выходе.

Максимальная температура металлической базовой панели модуля в процессе эксплуатации не должна превышать 85 °С. Если из-за плохих условий охлаждения температура базовой панели достигает 90 °С, модуль переходит в режим Shutdown.

Защита модуля HAM от короткого замыкания в электрической цепи, подключенной к выходу модуля, позволяет предотвратить перегорание входного плавкого предохранителя (рис. 4) и обеспечивает возврат модуля к нормальной работе после устранения неисправности.

Устройство защиты от перенапряжения на выходе ограничивает выходное напряжение модуля HAM на уровне 420 В. Если амплитудное значение входного напряжения достигает 420 В, вырабатывается логический сигнал низкого уровня на выходе E/O, который переводит выходные DC/DC-конвертеры в режим Shutdown. Одновременно с этим активируется дополнительная защитная цепь, понижающая выходное напряжение модуля HAM.

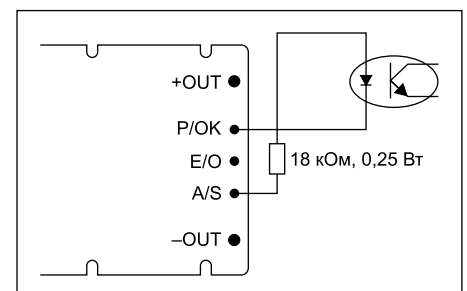


Рис. 9. Использование выхода A/S для питания первичной цепи оптрона

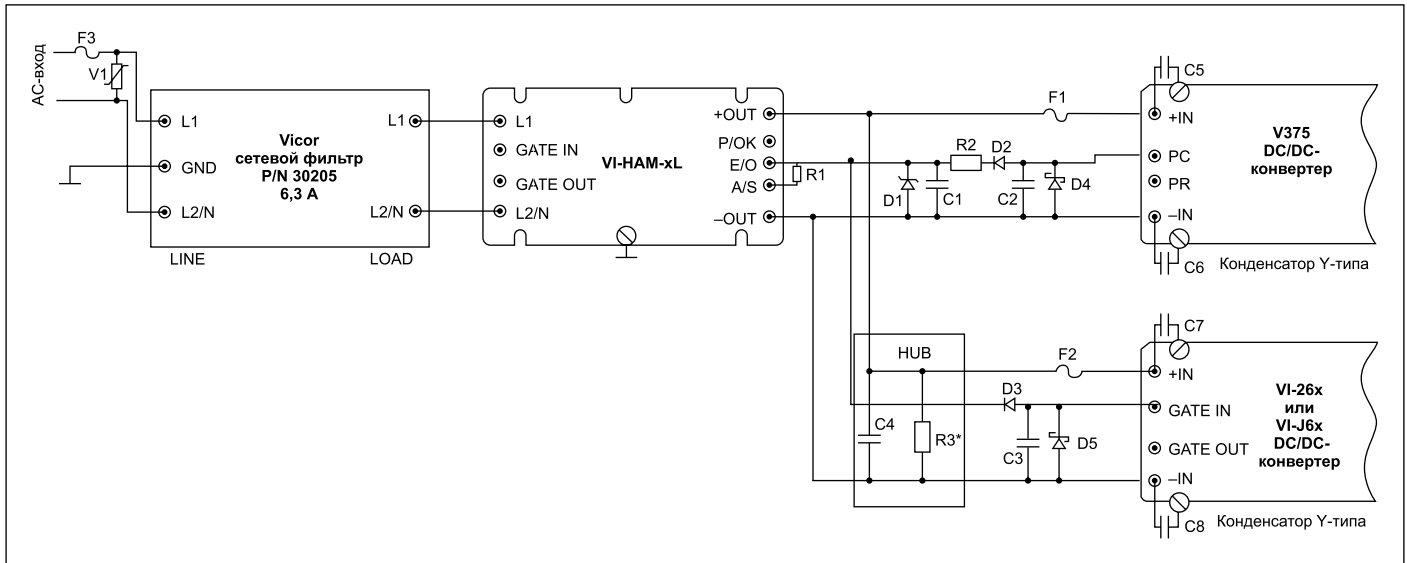


Рис. 10. Принципиальная схема AC/DC-конвертера с коррекцией коэффициента мощности

На рис. 10 приведена принципиальная схема AC/DC-конвертера, коэффициент мощности которого превышает 0,99. Кроме вышеупомянутого сетевого фильтра, модуля НАМ и выходных DC/DC-конвертеров Vicor, рассмотренных в статьях [1, 2], в состав устройства входят еще несколько дискретных компонентов: плавкие предохранители F1–F3, металлооксидный варистор (MOV) V1, Hold-up конденсатор C4, стабилитрон D1 с напряжением стабилизации 6,2 В, керамические конденсаторы C1–C3, помехоподавляющие конденсаторы Y-типа C5–C8, диоды Шоттки D4 и D5, маломощные полупроводниковые диоды с допустимым обратным напряжением 800 В и резисторы R1–R3. Большинство из этих компонентов входит в программу поставок компании Vicor (табл. 2), что существенно упрощает поиск комплектующих для реализации проекта. Вместо конденсатора C4 и резистора R3 можно взять одну из готовых сборок Hold-up Box (HUB), предназначенных для использования совместно с модулями НАМ (рис. 10). Полное описание элементов, входящих в состав AC/DC-конвертера, а также других аксессуаров, поставляемых компанией Vicor, можно найти на сайте компании [6].

Сетевой фильтр, рекомендуемый компанией Vicor для использования в качестве входного фильтра для модуля НАМ (НАМ-фильтр), предназначен для подавления кондуктивных помех, создаваемых модулем НАМ, и защиты модуля от переходных перенапряжений

Таблица 2. Перечень дискретных компонентов, поставляемых компанией Vicor для построения AC/DC-конвертера с коррекцией коэффициента мощности

Позиционное обозначение компонента на принципиальной схеме (рис. 10)	Артикул компонента в программе поставок компании Vicor
V1	30076
D2, D3	00670
D4, D5	26108
C5–C8	01000

(Transient Voltage Suppression, TVS) в питающей сети. В состав НАМ-фильтра входят помехоподавляющий конденсатор X-типа (Cx), дифференциальный (LD) и синфазный (LC) дроссели, два конденсатора (Cy), три последовательно соединенных TVS-диода (D1–D3) и резистор R (рис. 11). Параметры этих компонентов приведены на сайте [6], и, при желании, разработчик источника питания может собрать такой фильтр самостоятельно.

AC/DC-модули VI-HAMD и VI-BAMD

Рассмотренные модули серий VI-HAM-xL и VI-HAM-xM имеют номинальную мощность 600 и 675 Вт соответственно, что ограничивает выходную мощность AC/DC-конвертера. Для построения сетевых источников питания с активной коррекцией коэффициента мощности и суммарной (по всем

выходам) номинальной выходной мощностью более 600 Вт компания Vicor предлагает модули VI-HAMD и VI-BAMD, которые отличаются от модулей семейства VI-HAM тем, что не содержат встроенного выпрямителя.

Модуль VI-HAMD (драйвер) синхронизируется с питающей сетью с помощью внешней цепи, состоящей из двух диодов Dsynch. К узлу, в котором диоды соединяются между собой, подключается вход GATE IN модуля VI-HAMD (рис. 12). Модуль VI-BAMD (бустер) работает под управлением драйвера. Для синхронизации модулей друг с другом выход GATE OUT драйвера соединяется с входом GATE IN бустера. Силовые входы +IN и –IN и выходы +OUT и –OUT модулей VI-HAMD и VI-BAMD соответственно объединяются, и к выходам подключается общий Hold-up конденсатор или HUB. Полный перечень элементов схемы, приведенной на рис. 12, можно найти на сайте компании Vicor [6].

Заключение

В будущих выпусках журнала «Компоненты и технологии» мы продолжим обзор продукции компании Vicor и расскажем о других семействах модулей, предназначенных для построения вторичных источников питания электронной аппаратуры. ■

Литература

1. Белотуров В., Иванов Д., Кривченко И. Построение источников питания на базе модулей компании Vicor // Компоненты и технологии. 2011. № 12.
2. Белотуров В., Иванов Д., Кривченко И. DC/DC-конвертеры Vicor второго поколения // Компоненты и технологии. 2012. № 1.
3. Белотуров В., Иванов Д., Кривченко И. AC/DC-модули компании Vicor // Компоненты и технологии. 2012. № 4.

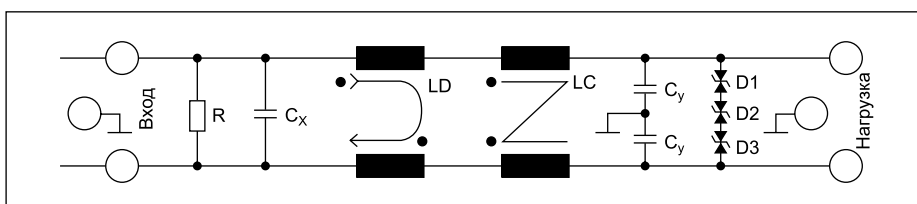


Рис. 11. Принципиальная схема НАМ-фильтра (Vicor Part Number 30205)

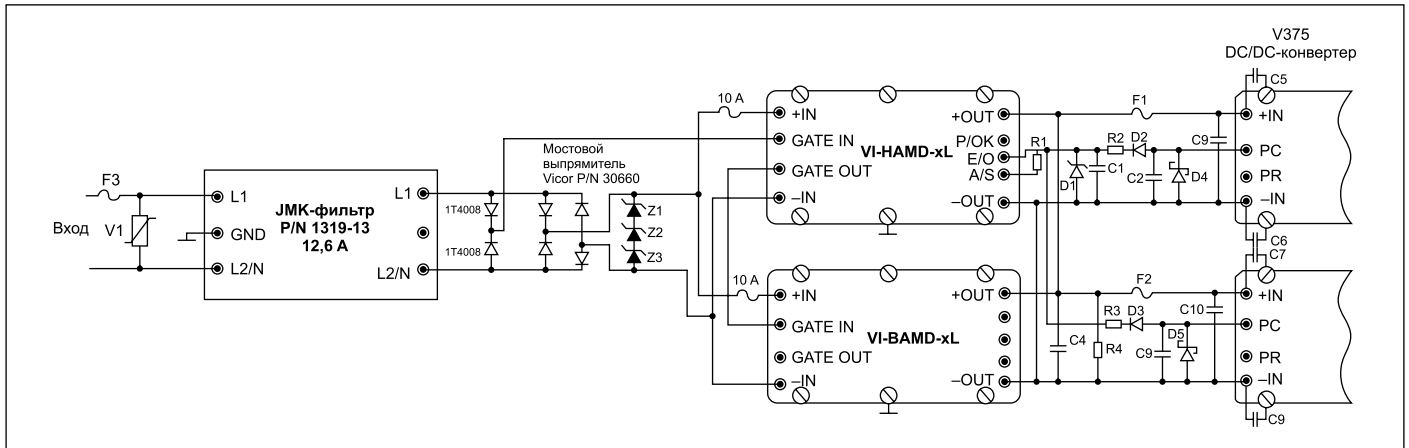


Рис. 12. Принципиальная схема AC/DC-конвертера на базе модулей VI-HAMD и VI-BAMD

4. Овчинников Д. А. Разработка и исследование однофазных корректоров коэффициента мощности: Дис. канд. техн. наук. М.: 2004.
5. ГОСТ Р 51317.3.2-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.
6. Справочно-информационный портал компании Vicor — www.vicorpower.com