

# DC/DC-КОНВЕРТОРЫ КОМПАНИИ VICOR

Владимир Белотуров, ст. инженер-консультант, ООО «ЭФО», г. Санкт-Петербург

Фирма Vicor специализируется на разработке и производстве модулей, предназначенных для построения источников и систем электропитания. Продукция фирмы включает в себя широкий спектр сетевых выпрямителей, фильтров [1, 2], DC/DC-конверторов, а также конструктивно законченных блоков питания. В статье рассмотрены схемотехнические и конструктивные особенности, основные технические характеристики и номенклатура серийно выпускаемых DC/DC-конверторов. DC/DC-конверторы фирмы Vicor являются продуктом современных высоких технологий. В них воплощены многочисленные оригинальные схемотехнические и конструктивные идеи. На сегодняшний день они являются примером современных Hi-Tech источников питания [3].

Американская фирма Vicor начала свою деятельность в начале 80-х гг. прошлого столетия, предоставив в распоряжение разработчиков стандартизованный набор модулей, из которых можно было «собирать», наподобие детского конструктора Lego, источники питания (ИП), различные по мощности и другим эксплуатационным параметрам. Таким образом, был совершен переход к идеологии построения систем распределенного питания, которые в настоящее время находят все более широкое применение. По своим массогабаритным и электрическим параметрам продукция компании Vicor по тем временам была практически уникальной, она и предназначалась, в основном, для использования в военной технике. Разработка оказалась очень удачной, поэтому и сейчас выпуск продукции 1-го поколения продолжается. Всего за 20 лет было изготовлено более 20 млн. модулей.

С середины 90-х гг. компания Vicor начала выпуск DC/DC-конверторов 2-го поколения, которые в настоящее время являются одними из лучших на рынке по показателям плотности мощности. Vicor постоянно отслеживает новейшие достижения в сфере разработки ИП и предлагает свои оригинальные решения. Например, в

2003–2005 гг. был модернизирован технологический процесс изготовления DC/DC-конверторов 2-го поколения, названный FasTrack Program. Результатом этого усовершенствования стало повышение надежности модулей, снижение помех и шумов, улучшение тепловых характеристик. В эти же годы компания Vicor предложила концептуально новый подход к построению распределенных систем питания, названный Factorized Power. Устоявшегося перевода этого термина пока нет, но основной смысл этой концепции можно передать следующим образом. DC/DC-конвертор обычно выполняет одновременно три основные функции: трансформацию напряжения, гальваническую развязку и стабилизацию выходного напряжения. Компания Vicor в Factorized Power предлагает разделить DC/DC-конвертор и, соответственно, его функции на два модуля, один из которых является предварительным стабилизатором напряжения, а второй — трансформатором. Такой подход основан на том, что во многих случаях нет необходимости использовать все функции DC/DC-конвертора. В рамках этой программы были разработаны модули VI-Chips, имеющие рекордные показатели эффектив-

ности и плотности мощности. Модули с размером корпуса  $32 \times 21,6 \times 6$  мм и весом 12 г способны конвертировать мощность до 3300 Вт, имеют КПД более 92%, частоту преобразования до 3,5 МГц, макс. рабочую температуру  $125^\circ\text{C}$ . Концепции Factorized Power и преобразователям VI-Chips в дальнейшем будет посвящена отдельная публикация.

В настоящее время фирма Vicor серийно выпускает DC/DC-конверторы 1-го и 2-го поколений мощнос-

тью 25...600 Вт на корпус (см. рис. 1 и 2). Благодаря применению оригинальных схемотехнических решений, новейших технологий и материалов, плотность мощности достигает при этом  $70 \text{ кВт/дм}^3$ . Все производство компании Vicor сосредоточено на нескольких предприятиях в США, сборка модулей осуществляется на автоматизированных оперативно перепрограммируемых линиях, способных производить в день до 8 тыс. модулей 1-го поколения и до 2 тыс. модулей 2-го поколения.

## Общие характеристики модулей

**Универсальность типоразмеров.** В зависимости от мощности преобразования модули имеют 3 стандартных типоразмера. Для 1-го поколения это размер «кирпич» ( $117 \times 56 \times 12,7$  мм мощностью 75,



Рис. 1. DC/DC-конверторы 1-го (а) и 2-го поколений (б)

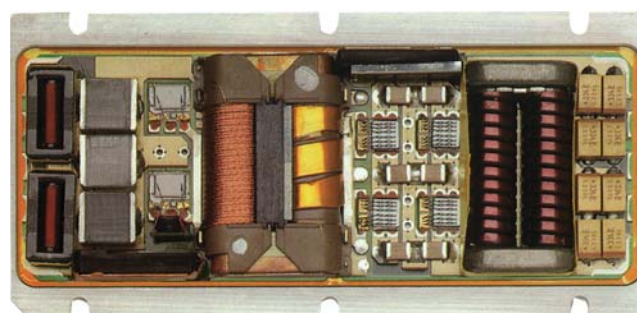


Рис. 2. Внутреннее устройство конверторов 2-го поколения



Рис. 3. Монтаж модулей «в плату» и «на плату»

100, 150, 200 Вт и «полкирпича» (half-brick)  $58 \times 56 \times 12,7$  мм мощностью 25, 50, 75, 100 Вт. Для 2-го поколения — «кирпича» до 600 Вт и «четверть кирпича»  $58 \times 37 \times 12,7$  мм до 150 Вт.

**Конструктивное исполнение.** В пластмассовом корпусе модуля смонтированы печатная плата и электронные компоненты, которые залиты специально подобранным силиконовым компаундом. Корпус помещен на алюминиевую пластину-основание, служащую для отвода выделяемого тепла и крепления модуля. **Заливка модуля.** Компаунд защищает компоненты от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды и способствует равномерному распределению тепла по объему модуля. Двух-трехкратная разница стоимости модулей для коммерческого, промышленного и военного исполнений, в основном, определяется именно подбором компаунда и технологией его заливки (вакуумное центрифугирование).

Универсальность конструкции модулей предоставляет широкие возможности конструкторам с точки зрения монтажа. При помощи стоек они могут крепиться на плату, радиатор или стенку прибора. Выводы могут быть удлиненные для монтажа «на плату» или короткие для монтажа «в плату» (см. рис. 3). Во втором варианте высота сборки составляет всего 13–14 мм. Кроме этого, если требуется возможность оперативной замены модулей, выпускаются специаль-

ные разъемы. Как опция, существует также конструктивное оформление модулей для навесного монтажа MegaMod Family с подсоединением к выводам «под винт» (см. рис. 4).

**Температурный диапазон.** Все модули выпускаются в нескольких вариантах (градациях) по температуре эксплуатации. Общими для 1-го и 2-го поколений являются «коммерческий» (С)  $-25...100^\circ\text{C}$ , «промышленный» (I, H)  $-40...100^\circ\text{C}$  и «военный» (M)  $-55...100^\circ\text{C}$  диапазоны эксплуатации с минимальными температурами хранения соответственно  $-40^\circ\text{C}$ ;  $-55^\circ\text{C}$ ;  $-65^\circ\text{C}$ . Кроме этого, для 1-го поколения доступны модули в исполнении «эконом» (E) с температурой эксплуатации  $-10...85^\circ\text{C}$ , а для 2-го — в исполнении (T):  $-40^\circ\text{C}$  эксплуатация и  $-40^\circ\text{C}$  хранение.

**Надежность.** Надежность — один из основных параметров, характеризующих качество ИП. Показатели надежности учитывают схемотехнические решения, качество материалов, технологические процессы и «культуру производства». Благодаря высокой надежности, продукция компании Vicor широко применяется в военной технике и другом ответственном промышленном оборудовании. Среднее время наработки на отказ (MTBF — Mean Time Before Failure), рассчитанное в соответствии с методикой MIL-HDBK-217F (Reliability Prediction of Electronic Equipment) с применением математического пакета RelCalc, составляет более 2 млн. ч при  $25^\circ\text{C}$



Рис. 4. Конструктивное оформление модулей MegaMod

при полной нагрузке. При температуре  $65^\circ\text{C}$  MTBF составляет несколько сотен тыс. часов. Согласно методике вычисления, исходя из реально продемонстрированного времени наработки (некоторые модули 1-го поколения эксплуатируются более 20 лет), надежность составляет более 20 млн. ч. Каждый модуль исполнения I(H) и M проходит контроль и тестирование на удовлетворение заявленным параметрам. Контроль включает в себя несколько термических циклов, замер параметров при высшей и низшей температуре, визуальный осмотр. Результаты испытаний помещаются на сайт фирмы Vicor, и по серийному номеру модуля можно получить паспорт с реально замеренными параметрами на конкретное изделие. Вся продукция фирмы Vicor имеет соответствующие сертификаты по электробезопасности, шумам и помехам. Кроме этого модули исполнений I(H) и M удовлетворяют стандартам MIL-STD-810, MIL-STD-901, MIL-STD-202 по механическим (разрежение, удар, вибрация) и климатическим (температура, влажность, солевой туман) воздействиям.

**Особенности схемотехнических решений.** В отличие от большинства производителей, компания Vicor в своих DC/DC-конверторах использует частотно-импульсный (квазирезонансный) метод преобразования энергии (ЧИМ) (см. рис. 5). При таком методе переключение силового MOSFET-транзистора происходит при нулевом значении тока

или напряжения (ZCS — Zero Current, Zero Voltage Switching). Энергия передается посредством импульсов («квантов»), одинаковых по длительности и амплитуде; форма импульсов — положительный полупериод синусоиды. Стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет изменения частоты импульсов. Импульс энергии формируется в контуре, состоящем из индуктивности рассеяния трансформатора T1 и емкости C. Частота импульсов в зависимости от мощности на нагрузке и входного напряжения может изменяться от десятков кГц до 2 МГц. В номинальном режиме частота преобразования лежит в пределах 1,0–1,5 МГц. Для гальванической развязки в цепи обратной связи в DC/DC-конверторах первого поколения применены оптроны, во втором поколении — разделительные трансформаторы, что повысит их надежность. Кроме этого, схемы управления ключами (драйверы) и схемы обратной связи двух поколений различаются. Из-за этих различий нельзя применять модули выпрямителей 1-го поколения VI-AIM с DC/DC-конверторами 2-го поколения [2].

Благодаря использованию ЧИМ компании Vicor удалось поднять частоту преобразования до 1,5 МГц и за счет этого применить компоненты меньших размеров, существенно уменьшить уровень шумов и помех по сравнению с ШИМ-преобразователями, увеличить к.п.д. Типовое значение к.п.д. DC/DC-конверторов компании Vicor составляет 82–92% во всем допустимом диапазоне входных напряжений и нагрузок.

### Номенклатура преобразователей

**DC/DC-конверторы 1-го поколения.** Конвертор выбирается по совокупности требуемых параметров, приведенных в таблице 1.

Пример обозначения: VI-26M-IV — DC/DC-

конвертор 1-го поколения, семейства VI-200, входное напряжение 300 В (200–400 В), выходное напряжение 10 В, температурный диапазон – «индустриальный», выходная мощность 150 Вт. Семейство «Booster» не имеет схемы управления по выходу, за счет этого они дешевле соответствующих VI-200. Стоимость модулей, в основном, определяется их мощностью и температурным диапазоном и не зависит от входных/выходных напряжений. Диапазон регулирования выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  для модулей с  $U_{\text{ВЫХ}} > 12$  В составляет 50–110% от  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}$ , а для модулей с  $U_{\text{ВЫХ}} < 12$  В –  $\pm 10\%$  от  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}$ .

### DC/DC-конверторы

**2-го поколения.** Во втором поколении DC/DC-конвертеров компании Vicor набор входных и выходных напряжений не так широк. Это связано со сложившимися стандартами используемых в современной аппаратуре напряжений. По входному напряжению  $U_{\text{ВХ}}$  имеются только 4 семейства: 24, 48, 300, 375 В с выходными напряжениями 2, 3,3, 5, 12, 15, 24 и 48 В, но с более широкими возможностями регулирования выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  – 10–110% от  $U_{\text{ВЫХ.НОМ}}$ . Для конвертеров с  $U_{\text{ВЫХ}} = 2$  В и 3,3 В минимальное напряжение, которое можно установить, составляет 0,5 В. Выходная мощность определяется размером корпуса и составляет в зависимости от  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

- Micro – «четверть кирпича» 50–150 Вт;
- Mini – «полкирпича» 100–300 Вт;
- Maxi – «кирпич» 160–600 Вт.

Пример обозначения: **V300A24H500BL** – DC/DC-конвертор 2-го поколения,  $U_{\text{ВХ}} = 300$  В (180–375 В), корпус Maxi, 500 Вт, «индустриальный» диапазон температур, с удлиненными выводами. Семейство V375 разработано для применения совместно с модулями корректоров коэффициента

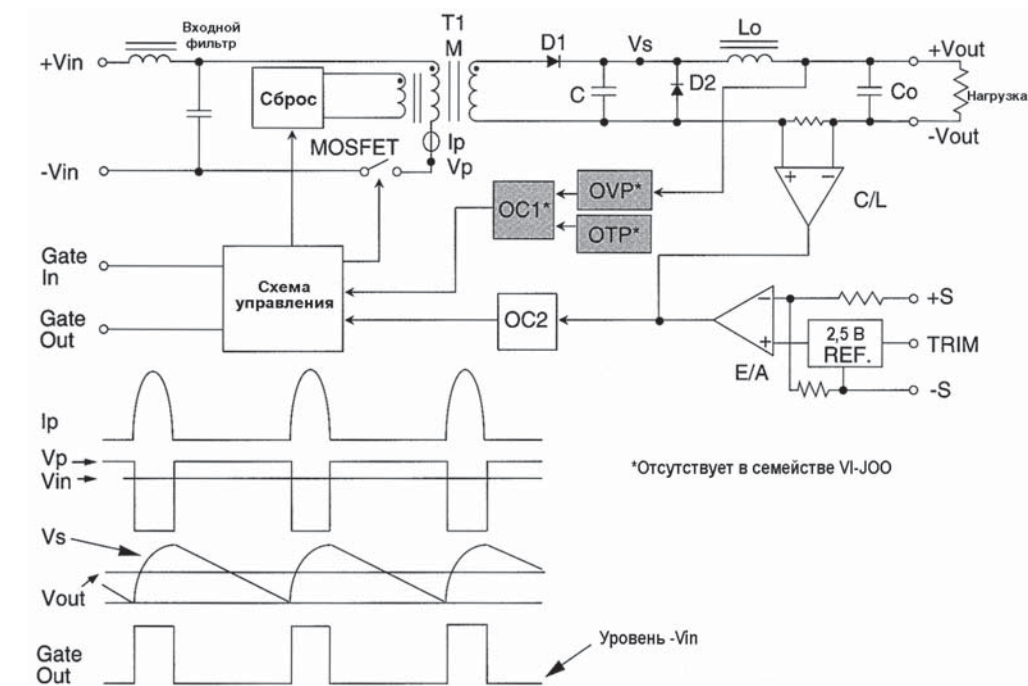


Рис. 5. Блок-схема DC/DC-конвертора 1-го поколения. OC1, OC2 – оптопары, OVP (over voltage protection) – защита от превышения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , OTP (over temperature protection) – защита от перегрева

мощности, обычно имеющими выходное напряжение около 360 В [2].

По таким параметрам как точность установки напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , стабильность напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  при изменении нагрузки, температуры, конвертеры Vicor демонстрируют лучшие показатели, свойственные современным преобразователям такого класса [3]. В то же время они обладают рядом дополнительных возможностей, существенно расширяющих область их применения. К таким возможностям относятся: параллельное включение модулей, возможность последовательного включения (как по входу, так и по выходу), дистанционное включение/отключение, регулировка выходного напряжения в широких пределах, компенсация падения напряжения на проводниках от модуля к нагрузке.

**Параллельное включение** модулей реализуется путем соединения выводов **PR (Parallel)** для синхронизации частоты преобразования. Как указывалось ранее, в DC/DC-конвертерах компании Vicor реализован при-

Таблица 1. Основные параметры DC/DC-конвертеров 1-го поколения

Семейство	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	Температурная градация	Мощность, Вт
2 – VI-200	0 12	Z 2	E	VI-200: 50, 75, 100, 150, 200
J – VI-J00	1 24	Y 3,3	C	VI-J00: 25, 50, 75, 100
B – Booster	W 24	O 5	I	
	2 36	X 5,2	M	
	3 48	W 5,5		
	N 48	V 5,8		
	4 72	T 6,5		
	5 110	R 7,5		
	Т 150	M 10		
6 300	1 12			
7 150/300	P 13,8	2 15		
	N 18,5	3 24		
	L 28	J 36		
	K 40	4 48		
	H 52	F 72		
	D 85	B 95		

нцип ЧИМ. Поэтому, если одинаковые модули работают на одной частоте, они конвертируют одинаковую мощность. Таким образом, осуществляется равномерное (с точностью до 5%) распределение токов по модулям. Вывод PR является двунап-

равленным портом, поэтому в массиве модулей роль ведущего (драйвера) автоматически принимает на себя модуль с большей частотой, а остальные подстраиваются под него (бустеры). Если система составлена из N + M модулей, то N модулей



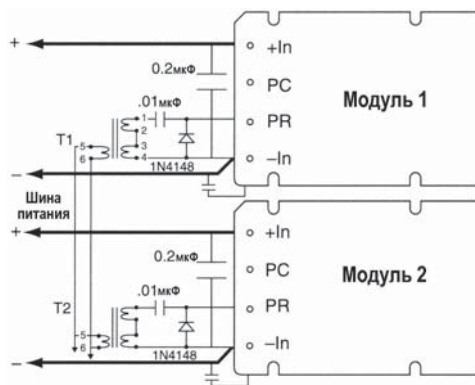


Рис. 6. Вариант параллельного включения модулей с разделительными трансформаторами

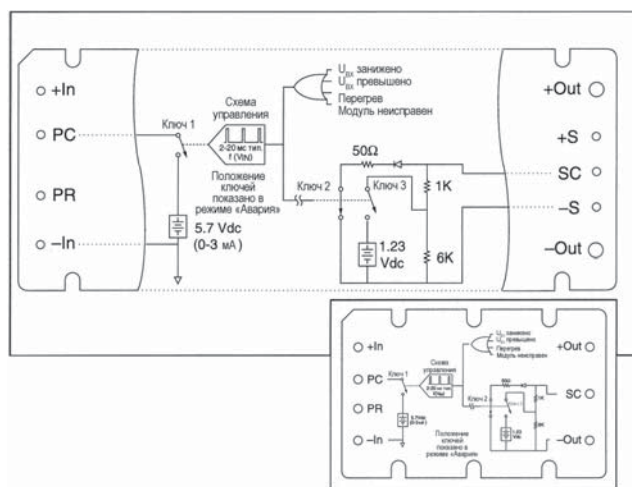


Рис. 7. Логическая схема защит (на вставке – Мiсro-модуль)

можно включить драйверами, а М – «бустерами». Перевод модуля в режим «бустера» осуществляется соединением выводов SC и –S, при этом отключается схема управления выходом. Такое решение используется, если требуется получить выходное напряжение, отличное от номинального. В этом случае один модуль включают «драйвером» – именно он задает  $U_{\text{вых}}$ , а остальные «бустерами». PR-выводы разных модулей могут быть соединены между собой несколькими способами. Самый простой – непосредственно проводником. Если требуется обеспечить сохранение работоспособности системы в случае выхода из строя одного или нескольких модулей, то соединение следует осуществлять через конденсатор. Для обеспечения помехоустойчивости системы (например, если модули находятся

на большом расстоянии друг от друга или на разных платах) модули следует соединять через разделительный трансформатор (см. рис. 6). Такое оригинальное решение позволяет достаточно просто наращивать мощность конечной системы и обеспечивать режим резервирования.

Резервирование можно осуществить по схеме  $N + 1$  (в общем случае,  $N + M$ ), что экономически выгоднее, чем обычно применяемая схема 2N. Поясним это на примере ИП мощностью 500 Вт. Его можно сконструировать из двух модулей по 500 Вт (схема резервирования 2N) или из трех по 250 Вт (схема 2N + 1). Во втором случае при нормальном функционировании каждый модуль берет на себя 1/3 общей мощности. В случае выхода из строя одного из модулей остальные

два продолжают нормальную работу. Экономический эффект особенно ощутим, если система состоит из большого числа модулей. Допускается параллельное соединение до 12 модулей.

PC-вывод (**Primary Control**) позволяет дистанционно управлять включением/отключением модулей. Его также можно использовать для индикации состояния модуля (вкл./откл.). На выводе PC формируется (или принимается) сигнал логического уровня 0/5 В. В качестве переключателя могут быть использованы контакты (тумблера, реле) или сигнал логического уровня 0/5 В. При  $U_{\text{PC}} > 2,3$  В модуль включен, а при  $U_{\text{PC}} < 2,3$  В – выключен.

Выводы +S и –S (**Sense**) предназначены для компенсации падения напряжения на проводниках, идущих от модуля к нагрузке. Допускается компенсация падения напряжения до 0,5 В.

SC (**Secondary Control**): изменяя потенциал на этом выводе, можно регулировать выходное напряжение. Например, чтобы понизить выходное напряжение относительно номинального, надо соединить через резистор вывод SC с выводом –S, а чтобы повысить – с выводом +S. При этом следует учитывать, что у конвертора имеется защита по допустимому току, поэтому при понижении  $U_{\text{вых}}$  пропорционально будет снижаться и допустимая мощность преобразователя.

Конверторы компании Vicor имеют встроенные системы защиты:

- от понижения  $U_{\text{вх}}$  ниже допустимого уровня;
- от превышения выходным напряжением  $U_{\text{вых}}$  номинального уровня  $U_{\text{вых.ном}}$  на ~15%;
- от перегрева.

При срабатывании одной из систем защиты модуль отключается и затем каждые 2–20 мс пытается стартовать заново. При этом на выводе PC появляются импульсы, которые можно использовать для индикации состояния

конвертора (см. рис. 7). При устранении неисправности модуль автоматически переходит в активный режим.

Конверторы можно также перевести в режим стабилизатора тока путем добавления токоизмерительного резистора и операционного усилителя с подачей сигнала обратной связи на вывод SC. Такое решение реализовано в семействе программируемых источников тока **BatMod**, предназначенных для зарядки аккумуляторов с номинальным напряжением 12, 24, 48 В при питании от сети постоянного тока 48, 150, 300 В на мощность до 200 Вт. BatMod обладают тем же набором свойств, что и DC/DC-конверторы 1-го поколения: выпускаются в четырех температурных градациях E, C, I и M, могут быть соединены параллельно. Также они имеют вывод для установки выходного тока и вывод для контроля тока.

В связи с тем, что конверторы компании Vicor являются достаточно сложными устройствами и обладают широким спектром возможностей, их корректное применение требует учета ряда особенностей. На сайте фирмы [www.vicorpower.com](http://www.vicorpower.com) можно найти инструкции по использованию, рекомендации по пайке, борьбе с шумами и помехами, обеспечению безопасного теплового режима. Кроме этого, квалифицированную техническую консультацию можно получить у официального представителя Vicor в России – фирмы «ЭФО».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белотуров В. Модули фильтрации и защиты от перенапряжений фирмы Vicor. Силовая электроника, 2004, №2.
2. Белотуров В. Решения Vicor для построения AC-DC источников питания для жестких условий эксплуатации. Силовая электроника, 2005, №2.
3. Колтаков А. Источники в стиле Hi-Tech. Электронные компоненты, 2003, №6.