

# ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОНВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ КЛАССА DC-DC

**Александр Гончаров**, к.т.н., Главный конструктор фирмы «Александр Электрик»

*“Лучший источник вторичного электропитания – это его полное отсутствие”  
(шутка системщиков)*

## ВВЕДЕНИЕ

Реклама конверторных модулей источников вторичного электропитания класса DC-DC весьма заметна на общем рекламном фоне электронных компонентов. Авторы рекламы обещают за счет применения модулей DC-DC решить почти все проблемы электропитания, приводят загадочные и очень впечатляющие тысячи Ватт в кубическом дециметре. Стоимость таких модулей заметно выше стоимости обычных компонентов – резистора, конденсатора, компаратора или типового микропроцессора.

Так что же это такое – модуль DC-DC? Электронный ли это компонент или все таки электронная система в виде законченного блока или радиоэлектронного прибора? На основе своего опыта работы Главным конструктором фирмы “Александр Электрик” автор пытается ответить на принципиальные вопросы, связанные с конверторными модулями DC-DC. В первую очередь такие:

- действительно ли конверторные модули DC-DC являются прогрессивным направлением для разработчиков и производителей радиоэлектронной аппаратуры при построении систем электропитания;

- на какие параметры модулей необходимо обращать внимание в первую очередь при их выборе для конкретной аппаратуры;

- каких подводных камней необходимо опасаться при использовании модулей различных фирм;

- как правильно обеспечить тепловые режимы работы модулей;

- что делать, если помехи от модулей являются серьезной проблемой в аппаратуре;

- и вообще, как сделать, чтобы не была горькой известная шутка системщиков: “Лучший источник вторичного электропитания – это его полное отсутствие”.

(Должен честно заметить, что автор заранее знает ответы на эти вопросы, а также подозревает такое знание и у некоторых других людей, однако имеет амбициозные планы рассказать о модулях без надоевших всем формул, на пальцах, держа при этом интригу).

## ОТ АДАМА

Первичный источник электроэнергии, будь то одноразовая химическая батарея, аккумулятор, выпрямленное напряжение сети переменного тока, выходное напряжение электромеханического генератора или солнечная батарея, как правило, непригоден для высококачественного электропитания многочисленных цепей и устройств радиоэлектронной аппаратуры. Необходимо улучшить качество первичной электроэнергии – сделать напряжение стабильным, уменьшить пульсации, получить необходимые номиналы напряжения, обеспечить гальваническую развязку, воспрепятствовать проникновению в аппаратуру губительных перенапряжений и помех, и т. д. Для этого при построении системы электропитания используют источники вторичного электропитания (ИВЭП) – стабилизированные преобразователи напряжения – конверторные устройства, без

которых не может обойтись ни один источник вторичного электропитания. Именно к этому виду устройств относятся модули, преобразующие с гальванической развязкой постоянное напряжение одного номинала в постоянное напряжение другого номинала, т. е. конверторные модули класса DC-DC. Далее, для краткости, будем называть эти замечательные устройства просто и скромно – модули.

Являясь мощными системными компонентами с большим выделением тепла, ИВЭП объективно обладают заметно меньшей надежностью, чем другие функциональные устройства радиоэлектронной аппаратуры. Наряду с полупроводниками и микросхемами, в них используются весьма неудобные для конструктивной компоновки элементы – разноразмерные трансформаторы и дроссели, электролитические и керамические конденсаторы, мощные транзисторы и диоды, а также радиаторы, выводные элементы мощных входов и выходов. Все это объясняет тот печальный факт, что ИВЭП занимают в общем объеме и массе радиоэлектронной аппаратуры до 30...40% и, фактически, определяют всю надежность аппаратуры.

Обычно разработчикам аппаратуры приходится решать весьма трудную проблему построения оптимального ИВЭП для конкретной системы в конце общего проектирования, когда после разработки всех необходимых функциональных устройств становятся ясными требования, предъявляемые к системе электропитания, но при этом все сроки, отпущенные на проектирование, как правило, вышли.

Теоретически, специализированный ИВЭП, созданный для конкретной аппаратуры, всегда самый луч-

ший и оптимальный по материалоемкости, удельным показателям, электрическим характеристикам. Однако это справедливо только для данной аппаратуры при времени проектирования, близком к бесконечности. Реально в жизни через некоторое, часто небольшое время, рынок требует рождения новой аппаратуры, и все начинается сначала. Требуются значительные капитальные затраты на исследования, специальная аппаратура. Нужны специалисты высокой квалификации. Далее – муки при внедрении в производство, бесконечные корректировки, тратится много времени. Все это ради небольшой, как правило, партии производимой аппаратуры. Экономически оправданным такой ход разработки, внедрения и производства ИВЭП бывает только в случаях, когда востребована аппаратура, выпускаемая единичными экземплярами (например, в силу своей уникальности и дороговизны), либо наоборот, если речь идет об аппаратуре массового производства, такой как телевизор или магнитофон.

Во всех других случаях, а их подавляющее большинство, крайне важны сжатые сроки проектирования, быстрая сменяемость аппаратуры. Тогда выгодным является использование готовых унифицированных модулей электропитания, приобретаемых у специализированных фирм, производящих такие модули большими сериями.

Здесь действует знаменитый принцип агрегатирования, широко и успешно применяемый в машиностроении и не только. В противном случае представьте себе автомобиль (Мерседес – Бенц!), в котором какой-нибудь узел, например, генератор электроэнергии, уникальным образом “врисован” в специфичную конфигурацию конкретной модели кузова, составляя с ним неразрывное целое. То есть создан некий “генератор-кузов”. При всех технических выгодах этого экономика и затраты времени на проектирование делают такую ситуацию нереальной даже для дорогого агрегата, в результате применяется унифицированный генератор в виде отдельного агрегата, выпускаемый специализированной фирмой (Бош).

## ПЛЮСЫ И МИНУСЫ

Полезно четко представлять себе наиболее важные плюсы и минусы применения модулей. Как для любого технического устройства, обе чаши весов получаются достаточно отягощенными.

К минусам необходимо отнести:

- **увеличение общего количества электронных компонентов в аппаратуре при реализации многоканальных источников электропитания.** Действительно, использование большого количества одноканальных модулей вместо одного многоканального источника электропитания, фактически, является дроблением целого на много частей. Однако для трансформатора или дросселя это однозначно приводит к увеличению суммарного объема и стоимости, к снижению надежности. В большинстве случаев сказанное справедливо и для конденсаторов, и для мощных полупроводников. Можно говорить о снижении надежности и об увеличении занимаемого объема пропорционально увеличению числа компонентов;

- **увеличение стоимости источника или системы вторичного электропитания.** Действительно, универсальность модулей достигается определенной избыточностью в материалах и компонентах, а это приводит, по крайней мере, к увеличению суммарной стоимости изделия;

- **усложнение электромагнитного фона и помеховой обстановки источника вторичного электропитания.** Много модулей – и каждый из них является, как правило, асинхронным источником излучений и помех – формируют весьма сложное электромагнитное поле и образуют сложный спектр помех;

- **возможное уменьшение общего КПД источника электропитания.** Теоретически можно показать, что дробление целого, например, трансформатора ИВЭП, приводит к ухудшению его энергетических характеристик.

Если Вас не испугали минусы, то рассмотрим плюсы. К ним относятся:

- **значительная экономия времени проектирования ИВЭП, при**

**этом не требуются дорогостоящие разработчики с узкой специализацией.** Это экономия денег и других ресурсов;

- **высокая вероятность получения положительного результата, отсутствие этапов внедрения, подготовки производства и самого производства сложного ИВЭП.** А это опять экономия денег и ресурсов;

- **как это ни парадоксально – увеличение надежности ИВЭП.** Действительно, массовость производства модулей позволяет уникальным образом улучшить качество этой продукции и необычайно резко поднять надежность каждого отдельного модуля. (В настоящее время средняя наработка на отказ у модулей, выпускаемых достаточно долго и в больших количествах, доходит до единиц миллионов часов!);

- **получение качественно новых свойств системы электропитания.** Это возможности построения распределенных систем электропитания; улучшение электромагнитной совместимости узлов аппаратуры со встроенными модулями; потенциальное и практическое улучшение качества характеристик функциональных узлов, а также увеличения срока их работы за счет резкого повышения стабильности питающих напряжений при более мягких переходных процессах и т. д.;

- **конструктивная гибкость и преимущество построения аппаратуры с использованием конструктивно рассредоточенных модулей электропитания;**

- **практическое снижение потерь мощности в системе и повышение КПД за счет резкого сокращения длины силовых проводников.** В распределенных системах электропитания модули встраиваются в непосредственной близости к питаемым ими функциональным узлам.

Перечисленные плюсы применения модулей во многих случаях (или еще точнее – в достаточно многих) нивелируют отмеченные недостатки. И, что очень важно, благодаря модулям достигается многократная экономия денег и других ресурсов.

**Конверторные модули DC-DC являются прогрессивным направлением для разработчиков и произ-**

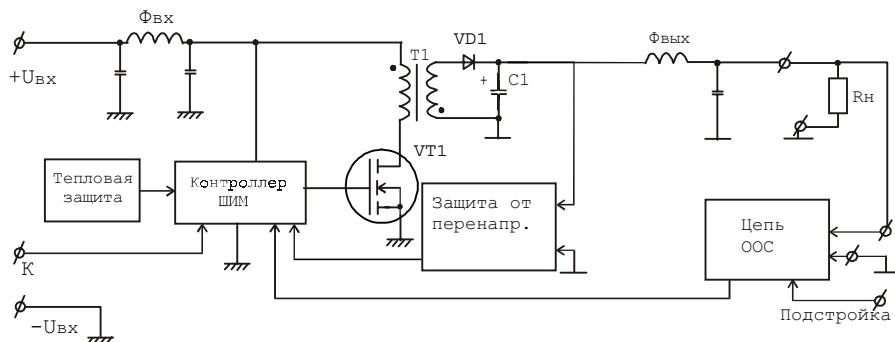


Рис. 1

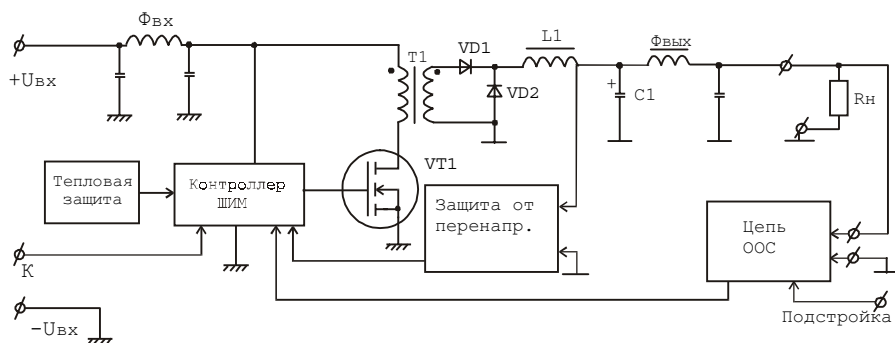


Рис. 2

водителей радиоэлектронной аппаратуры при реализации систем электропитания во многих практических ситуациях.

### ЧТО ТАМ ВНУТРИ

Итак, Вы держите в руках симпатичные плоские электронные компоненты, на которых обозначено, что это конвертеры DC-DC. Внешне они имеют вид больших интегральных схем. Больших в прямом смысле этого термина, так как их размер может доходить до размера небольшого плоского кирпича (или, если хотите, кирпича). Что же там внутри?

Если модуль имеет маленькую выходную мощность, 1...5...10 Вт, то он обычно выполняется по схеме обратного преобразователя, (рис. 1).

Силовой транзистор VT1 периодически открывается и закрывается схемой управления (контроллером ШИМ). За время открытого состояния VT1 в трансформаторе (многообмоточном дросселе) T1 накапливается энергия, которая затем, на этапе закрытого состояния VT1 через выпрямительный диод VD1 передается на выход и заряжает конденсатор C1. Изменяя относительную длительность импульсов открытого состояния, с помощью отри-

цательной обратной связи (ООС) схема управления имеет возможность обеспечивать стабилизацию выходного напряжения. В целом, в стабилизированном преобразователе образуется замкнутая система автоматического регулирования, устойчивость которой обеспечивается специальными методами.

С точки зрения устойчивости наиболее трудным режимом для таких преобразователей является режим холостого хода. Несмотря на то, что схема управления в таком режиме открывает транзистор VT1 на очень короткое время, в 50...100 раз меньшее, чем период коммутации, в конденсаторе C1 накапливается энергия, которая никуда не отдается. Все это приводит к увеличению выходного напряжения выше нормы и к полному выключению преобразователя. Через достаточно большое время преобразователь повторно включается. Далее процессы повторяются. В результате имеет место низкочастотная релаксация, а выходное напряжение имеет вид низкочастотных импульсов. При таком нарушении устойчивости часто единственным выходом на практике является намеренное введение в преобразователь потерь мощности для рассеивания

лишней накопленной энергии. Обычно это осуществляется с помощью дополнительного сопротивления нагрузки.

Если Ваш модуль имеет выходную мощность более 10...15 Вт, то он, как правило, выполнен по схеме прямоходового преобразователя (рис. 2).

Силовой транзистор VT1 периодически открывается и закрывается контроллером ШИМ. За время открытого состояния VT1 через трансформатор T1 на выход через выпрямительный диод VD1 передается энергия, часть которой накапливается в дросселе L1 и в конденсаторе C1. На этапе закрытого состояния VT1 выпрямительный диод VD1 закрывается, накопленная в дросселе L1 энергия открывает обходной диод VD2 и передается на выход. Здесь за счет изменения относительной длительности импульсов открытого состояния схема управления с помощью ООС обеспечивает стабилизацию выходного напряжения. Для обеспечения устойчивости образующейся замкнутой системы автоматического регулирования применяются специальные методы.

Для прямоходового преобразователя наиболее трудным с точки зрения устойчивости режимом является холостой ход. В этом случае в дросселе L1 наблюдается режим разрывных токов. Дроссель L1 и конденсатор C1 в таком режиме перестают играть роль интегратора, выделяющего среднее значение импульсного напряжения на входе дросселя L1 и переходят в режим пикового детектора. Несмотря на то, что схема управления в таком режиме открывает транзистор VT1 только на очень короткое время, выходное напряжение возрастает выше нормы. Это приводит к полному выключению преобразователя. Затем преобразователь повторно включается через достаточно большое время. Далее процессы повторяются. В результате отмечается низкочастотная релаксация выходного напряжения, которую обычно подавляют с помощью дополнительного сопротивления нагрузки.

Для обеспечения гальванического разделения входных и выходных цепей в ООС применяют транзисторные оптопары. Необходимо заметить, что оп-

троны подвержены заметному старению, а кроме того, их характеристики сильно меняются при изменении температуры.

### НЕОБХОДИМЫЕ МЕЛОЧИ

Надежность цепи ООС весьма важна для модулей. Представьте себе ситуацию, когда откажет какой-либо элемент модуля (кроме элементов цепи ООС). Модуль тихо “умрет”, не причинив вреда питаемой аппаратуре. Однако катастрофическими будут последствия отказа элемента цепи ООС. В этом случае модуль теряет возможность стабилизировать выходное напряжение, которое увеличивается в 2-3 раза. В результате ценная электронная аппаратура выходит из строя из-за отказа модуля, стоимость которого может быть на порядок меньше стоимости аппаратуры. Необходимо заметить, что применение простых устройств защиты от перенапряжений на выходе нечасто решает эту проблему, так как энергетические возможности простейших устройств – стабилитрона, тиристора, транзистора – ничтожны по сравнению с энергетикой модулей.

Поэтому в более дорогих (профессиональных) модулях используется дополнительный и независимый канал обратной связи, показанный на рис. 1 и 2. Задача последнего – полностью выключить модуль на достаточно длительное время при превышении выходного напряжения. С точки зрения надежности происходит как бы резервирование канала ООС. Кстати, без такого дополнительного канала цепи обратной связи весьма опасно использовать так называемую выносную обратную связь, случайный обрыв которой может привести к вышеперечисленным неприятностям.

Обычно цепь ООС соединена с выходом внутри конструкции модуля. В этом случае стабилизируется напряжение на выводах модуля. В то же время нагрузка модуля может быть удалена от модуля. В таком случае за счет падения на проводах напряжение на нагрузке может сильно отличаться от выходного напряжения модуля и быть нестабильным. Поэтому в ряде модулей используется выносная ООС, т. е. имеются два дополнительных вывода обратной связи.

Кроме того, в модулях применяется много других сервисных систем. Например, таких необходимых, как командные входы и выходы, как подстройка выходного напряжения и т. д. Из-за ограниченности объема статьи мы не будем их рассматривать. Однако важнейшими из сервисных систем являются высокочастотные фильтры и тепловая защита.

Дополнительные устройства, которые обязательно должны быть внутри модулей, это входные и выходные высокочастотные фильтры Фвх и Фвых (рис. 1, 2). Они могут быть выполнены по простейшим LC-схемам второго порядка, как это показано на рисунке, или быть достаточно сложными. **Главное – если фильтров в приобретенных Вами модулях нет, то не нужно радоваться малым габаритам таких (часто бесполезных!) модулей. Фильтры необходимо докупать!** Сами понимаете – фирма, навязавшая Вам урезанные модули, услужливо порекомендует купить у нее еще и дополнительные модули – фильтры.

О тепловой защите. Модули должны быть универсальными, конструктивно подходящими для большинства применений. Это достигается, если модуль можно будет использовать с любой системой охлаждения, можно будет “вписать” в конструктивный объем любой конфигурации. Поэтому для модуля необходимы весьма небольшие габариты и ярко выраженная плоскостность – низкий профиль. Ценой достижения такой миниатюризации является значительная концентрация выделяемого в объеме модуля тепла. Обеспечивая приемлемый тепловой режим и, как следствие, – повышая надежность, тепло можно отвести от модуля. Это осуществляется, например, с помощью радиатора и – далее – кондуктивно, конвективно или с принудительным охлаждением, жидкостным или воздушным. Вообще вариантов систем охлаждения модулей большое множество, именно поэтому производители модулей нормируют для них не температуру окружающей среды, а температуру корпуса! В этой ситуации крайне важно не допустить препятствий на пути отвода

тепла от модуля, например, воздушных промежутков (речь идет всего лишь о десятках микрон!) между модулем и радиатором.

В результате тепловая защита внутри модуля в большинстве случаев является единственным средством определения некачественно присоединенного к радиатору модуля, особенно если их в системе много. Защита просто начнет отключать “больной” перегретый модуль еще на этапе предварительных климатических испытаний аппаратуры и спасет не только модуль, но и репутацию производителя и поставщика аппаратуры – сор не будет вынесен из избы.

### МОДУЛЬ – ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПОНЕНТ

Таким образом, конверторный модуль – это, по крайней мере, небольшая электронная система, прибор, содержащий от 50...100 до 200...400 электронных компонентов. В тоже время, вследствие своей функциональной и конструктивной законченности, благодаря весьма широкому применению, из-за универсальности... **конверторный модуль сам является полноправным электронным компонентом**, зачастую устанавливаемым на печатную плату вместе с другими компонентами, образующими функциональные узлы и – далее – законченную систему в радиоэлектронной аппаратуре.

### КОНСТРУКЦИЯ МОДУЛЯ

В конструктивном смысле модули бывают корпусированные и бескорпусные. В основе их конструкции лежит печатная плата, на которой размещены бескорпусные и микрокорпусные компоненты. Как правило, это компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа – резистивные и конденсаторные чипы, маломощные диоды, транзисторы и микросхемы в микрокорпусах, мощные транзисторы и диоды в корпусах для поверхностного монтажа и, наконец, моточные элементы – трансформаторы, дроссели, имеющие вид плоских конструкций разнобразного исполнения.

В корпусированных модулях печатная плата помещается в пластиковый

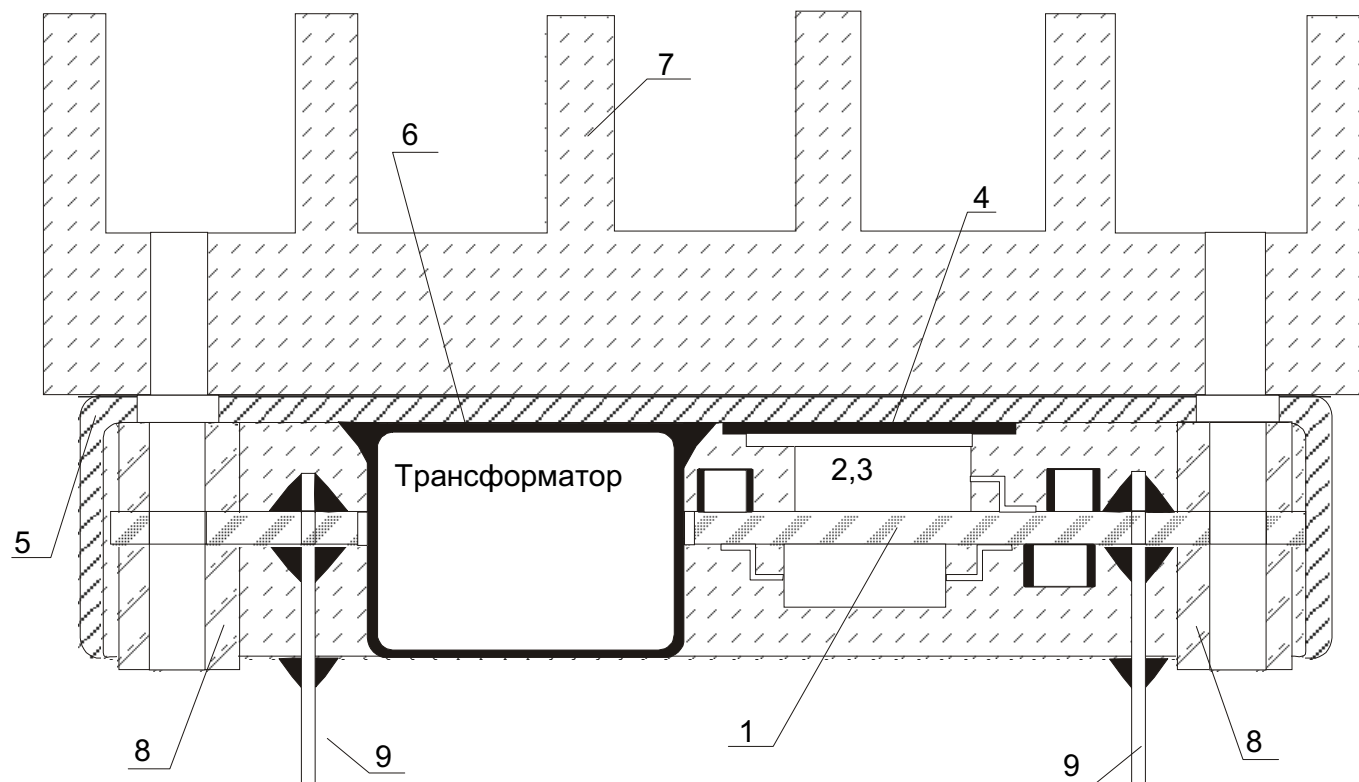


Рис. 3

(для маломощных модулей) или металлический корпус и заливается специальным компаундом с высокой теплопроводностью. Примером такой конструкции может служить модуль серии МИРАЖ. Такие модули выпускаются российской фирмой «Александр Электрик» (рис. 3). Размещенные на печатной плате (1) мощные компоненты с большим тепловыделением, например, силовой МОП-транзистор (2), выпрямительный диод (3) через эластичные изоляционные прокладки с хорошей теплопередачей (4) прижимаются к внутренней поверхности алюминиевого корпуса – крышки (5). Трансформатор и выходная дроссель, также выделяющие тепло, приближены к поверхности корпуса и залиты специальным высокотеплопроводящим компаундом (6). Это позволяет вывести тепло, выделяемое трансформатором и дросселем, на поверхность корпуса по пути с минимальным тепловым сопротивлением. Общая заливка компонентов в корпусе осуществляется эластичным компаундом нитрида бора, окиси алюминия и т. п. Она позволяет защитить все компоненты модуля от влаги, от вибраций и ударов, а также передает тепло, выделяемое в компонентах, на поверхность корпуса. Применяемые

для таких целей силиконовые компаунды отличаются эластичностью в диапазоне температур  $-60^{\circ}\text{C} \dots +200^{\circ}\text{C}$  и более! Это необходимо, чтобы исключить воздействие на внутренние компоненты модуля механических напряжений, возникающих в обычных, например, эпоксидных компаундах вследствие больших разниц температурных коэффициентов расширения компаунда и внутренних компонентов. Похожие конструкции имеют и другие типы модулей. Как вариант применяются модули, имеющие только локальные участки заливки наиболее тепло выделяющих компонентов. Имеются модули с базовой алюминиевой или медной платой – основанием, которое одновременно с функцией передачи тепла служит и печатной платой. При этом мощные транзисторы и диоды просто припаиваются к монтажным поверхностям платы, трансформаторы и дроссели приклеиваются теплопроводящим компаундом и т. п.

Здесь необходимо остановиться на широко рекламируемых в последнее время открытых бескорпусных модулях. Промоутеры таких модулей утверждают, что заливочные компаунды имеют лишь одно полезное свойство – скрыть от постороннего глаза произ-

водственные дефекты монтажа и сборки. Также утверждается, что для повышения надежности лучше допустить значительный перегрев отдельных мощных компонентов – транзисторов, диодов, трансформаторов, дросселей и воспрепятствовать за счет отсутствия компаунда (с помощью воздушных промежутков) передаче тепла от греющихся компонентов к менее греющимся конденсаторам, оптронам и т. п.

Такой взгляд представляется весьма спорным для многих практических ситуаций, а в ряде случаев – просто ошибочным. Действительно, в условиях продувки модулей сильным ламинарным потоком воздуха с целью охлаждения за счет образования локальных турбулентностей вокруг тепло выделяющих компонентов модуля можно как бы отдельно отвести тепло от мощных компонентов и не передавать его на конденсаторы, оптроны и микросхемы.

Однако модули, как правило, устанавливаются на печатных платах совместно с другими компонентами функциональных устройств, поэтому воздушный поток, доходящий до модулей, уже имеет значительные турбулентности, и вышеприведенный эффект сильно нивелируется. Кроме того, в большинстве случаев этот поток имеет до-

статочную высокую температуру, чтобы еще более увеличить тепловую напряженность мощных компонентов модулей, так как часто вентиляторы вытягивают тепловой поток из аппаратуры значительно большей мощности, чем тепловой поток самих модулей. Представьте себе, что вся выходная мощность модулей, например, 600 Вт рассеивается во внутреннем объеме самой аппаратуры, в модулях выделяется 60 Вт, а вентиляторам приходится вытягивать из аппаратуры все 660 Вт тепловой мощности. Пыль и грязь еще более обостряют эти проблемы, вспомните, как выглядят компоненты блока питания и лопасти вентилятора в блоке питания Вашего персонального компьютера после 1-2 лет эксплуатации.

Также необходимо помнить о том, что почти все компоненты модулей либо бескорпусные – резисторы, конденсаторы, либо микророботные – микросхемы, полупроводники, т. е. имеющие облегченные пластиковые корпуса, предназначенные для работы только в герметизируемых и влагозащищенных объемах. Поэтому без за-

ливки или сложного герметизированного корпуса в серьезных применениях не обойтись. А как же быть с вибрациями, ударами? В мощных модулях компоненты применяются с относительно большим весом, в этом случае компунд решает задачи обеспечения механической прочности.

Наконец, мнение о повышении надежности за счет уменьшения температуры маломощных компонентов при намеренном перегреве мощных компонентов достаточно парадоксально. Можно вспомнить, что именно мощные компоненты имеют на порядок большую частоту отказов по сравнению с маломощными.

Безусловно, с чем можно согласиться, так это с тем, что **при невысокой влажности, в комфортных температурных условиях, при отсутствии механических воздействий и при наличии ламинарного потока чистого обеспыленного охлаждающего воздуха применение бескорпусных модулей является весьма экономичным решением.**

Для того, чтобы притянуть основание корпуса модуля ("спинку" крышки)

к радиатору (7), а также для дополнительного крепления модуля служат гладкие или резьбовые втулки (8), которые, как правило, размещают по углам модуля (рис. 3). Выводами модуля обычно являются мощные штыри (9), рассчитанные на пропускание единиц и десятков ампер. Они либо впаиваются в аппаратную печатную плату (на рисунке не показана) для электрического соединения модуля с входной сетью и с нагрузкой, либо к ним припаиваются проводники объемного монтажа. При достаточном количестве штырей они служат надежным элементом крепления всего модуля к аппаратной печатной плате, а также через них отводится часть рассеиваемого модулем тепла в монтажные площадки на аппаратной печатной плате или в медные жилы проводников объемного монтажа. Иногда в особо мощных модулях вместо штырей используются медные шины.

*Окончание в журнале  
«Электронные компоненты» №3/99*

**alecsan@online.ru**

# ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОНВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ КЛАССА DC-DC

Окончание. Начало в журнале «Электронные компоненты» №1-2 за 1999 год)

**Александр Гончаров**, к.т.н., Главный конструктор фирмы «Александр Электрик»

## ТЕПЛО, ТЕПЛО, ГОРЯЧО

Все в природе теплее абсолютно нулю. Модули – не исключение, хуже того, иногда они обжигают. Для того, чтобы выдать в аппаратуру законные 100 Вт, любой модуль заберет из первичного источника электроэнергии 150...120...110 Вт и уж ни как не меньше 100 Вт. Разность между выходной мощностью и входной есть рассеиваемая в модуле тепловая мощность. Это тепло, которое необходимо контролировать, а иногда и принудительно отводить. Иначе модуль перегреется, срок его службы резко уменьшится, а может и сразу выйти из строя. Кроме того, модуль греет окружающие компоненты, что нежелательно. Рассеиваемая

мощность определяется весьма важным параметром – коэффициентом полезного действия (КПД):

$$P_{\text{расс}} = P_{\text{вых}} (1 - \text{КПД}) / \text{КПД}$$

При типовых значениях КПД 0,85...0,75 в модуле может рассеиваться в виде бесполезного тепла мощность, составляющая от 18% до 33% выходной.

Если Вы хотите профессионально применять модули, то Вам необходимо довольно точно знать типовую зависимость КПД от выходной мощности, соответствующую Вашим условиям применения. Потребуйте эти данные от поставщика модулей. Скорее всего, Вы не получите желаемое, если модули продает Вам посредник

и это вторые, третьи руки. Лучше обратиться к разработчикам и изготовителям модулей.

Обычно такая зависимость имеет вид, показанный на рис. 4. Характерными и очень важными являются участки графика при выходной мощности  $P_{\text{вых}}$ , близкой к максимальной, здесь КПД может несколько уменьшаться.

Небольшое уменьшение КПД при выходной мощности, близкой к максимальной, объясняется дополнительным ростом потерь в компонентах модуля при подходе к их предельным энергетическим возможностям. Уменьшение КПД составляет, как правило, 3...5% (в редких случаях это уменьшение может не наблюдаться). Максимальный КПД обычно соответствует 60%...70% выходной мощности. Отсюда следует важное правило: **применяйте модули с коэффициентом загрузки по мощности не более 0,6...0,7**. В результате модуль будет работать с максимальным КПД, рассеивать допустимую мощность, а его надежность будет близкой к предельной. Ограничение коэффициента нагрузки определяется и общими соображениями, такими же, как и для многих мощных компонентов, таких как транзисторы, диоды и т. д.

Очень часто модули работают при выходной мощности 20%...30% от максимальной, а то и меньшей. Обычно это происходит в системах электропитания с резервированием, в распределенных системах электропитания, в системах с потенциальным наращиванием. Но чаще всего потребитель покупает модуль, взяв излишние запасы

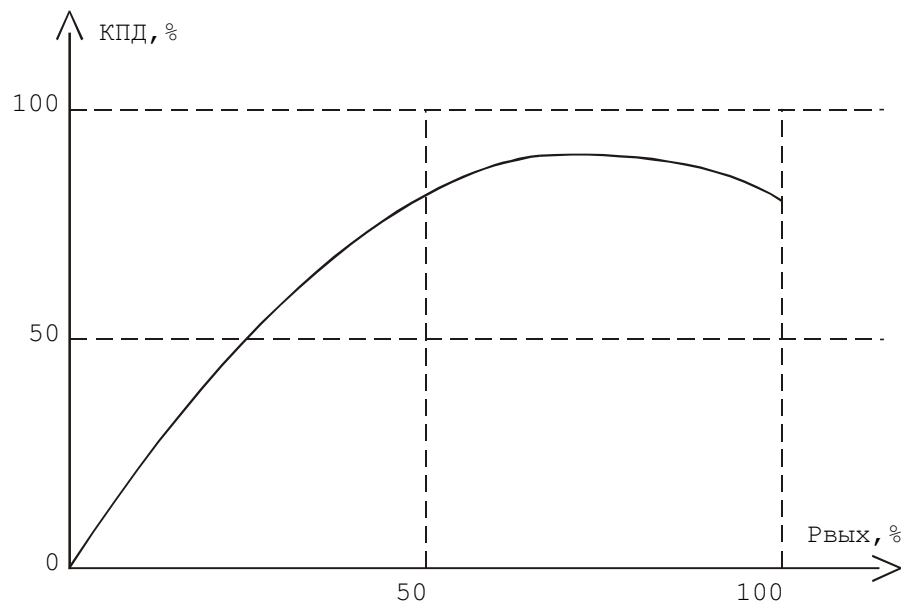


Рис. 4



сы по мощности. Действует славный принцип: **“Для лучшей лучшести!”** В этом случае обратите внимание на рис. 4. Учтите, что КПД будет в 1.5...2 раза меньше обещанного максимального, т. е. рассеиваться в тепло будет уже не 18%...33% выходной мощности, а все 100%...160% от выходной мощности, а это существенно, хотя сама выходная мощность невелика. Иногда это может стать неприятной неожиданностью. Автору известен случай, когда разработчики аппаратуры с системой электропитания, содержащей 40 параллельных резервированных модулей, работающих со средним коэффициентом по мощности 0,3, ориентировались на обещанный в рекламе американской фирмой-производителем максимальный КПД, равный 85%. Как правило, фирмы пишут в рекламе – КПД не менее ... Расплатой в этой истории была незапланированная и весьма дорогостоящая переделка системы охлаждения аппаратуры, срыв сроков поставки.

### КОГО ОБОГРЕТЬ

Надеюсь, после прочитанного у Вас наступает облегчение, так как Вы теперь знаете о многих подводных камнях применения модулей. Однако не обольщайтесь. После того, как Вы достаточно точно (точно не сумел еще никто) определили мощность рассеивания модуля, Вам нужно решить трудную задачу – определить, как эту мощность отвести.

Актуальность проблемы определяется тем фактом, что надежность большинства электронных компонентов сильно зависит от температуры. Приблизительно Вы можете считать, что **увеличение рабочей температуры на каждые 10°C уменьшает среднее время наработки на отказ вдвое!** И наоборот, каждые 10°C, выигранные Вами в битве с перегревом модуля, вдвое увеличат время наработки. Игра стоит свеч.

Кстати, не обижайтесь на параметры купленных Вами российских модулей, когда дается наработка на отказ, например, 100 000 часов при темпе-

ратуре 70°C, а в каталоге на схожий зарубежный модуль приведен аж миллион часов. В примечании Вы увидите, что этот миллион соответствует температуре 25°C, проделайте простейший расчет с удвоением. С некоторой долей юмора можно утверждать следующее: **Вам станет приятно, когда Вы получите цифру наработки на отказ отечественного модуля более двух миллионов зарубежных часов!**

Итак, Вы знаете, что необходимо отвести от модуля, например, 100 Вт тепловой мощности.

Во-первых, Вы должны достаточно точно знать температуру среды, окружающей модуль. Как правило, здесь Вас ждет большой сюрприз. В Вашей аппаратуре, скорее всего, максимальная температура воздуха вокруг модуля определяется не внешней окружающей температурой, а в большей степени выделением тепла от функциональных узлов. В них рассеивается практически вся выходная мощность системы электропитания. И эту тепловую мощность также необходимо каким-либо способом отвести. Кстати, эта задача может оказаться сложнее задачи отведения тепла от собственно модуля.

Во-вторых. Наконец-таки Вы знаете, что у Вас внутри в аппаратуре максимальная температура, например, +60°C. Исходя из необходимой надежности, вы определяете максимальную допустимую температуру корпуса модуля. Допустим, Вы можете себе позволить нагревать модуль до +75°C, т. е. перегрев составит 15°C. Далее Вам необходимо помнить следующее. При перегреве 35°C в условиях свободного конвекционного теплоотвода Вам необходим радиатор площадью 25 см<sup>2</sup> на каждый Ватт рассеиваемой мощности. В нашем случае это составит 100x25 = 2500 см<sup>2</sup>. Однако у нас допустимый перегрев в 2,3 раза меньше, поэтому необходим радиатор, площадь которого должна быть в 2,3 раза больше, т. е. 5800 см<sup>2</sup>.

Здесь Вас ожидает еще один сюрприз. **Предполагаемый объем конвекционного радиатора во много раз больше объема самого модуля.** Автор называет это “сюрпризом малень-

кого карлика”. Но это, как говорят в рекламных заставках, еще не все. Тепло от мощных компонентов модуля выводится на крышку тонкостенного корпуса в виде тепловых пятен малой площади. Тепло не может хорошо распределяться вдоль по поверхности корпуса, особенно если модуль не имеет сплошной внутренней заливки специальным теплопроводящим компаундом. В результате образуются концентраторы тепла – участки поверхности корпуса с большой температурой, поэтому Вам придется отводить тепло не от всей равномерно нагретой поверхности корпуса, а от небольшой части поверхности модуля. К тому же, Вы заранее не знаете, где у модуля эти самые тепловые концентраторы. Выход один – обязательно намазать теплопроводящую поверхность модуля специальной теплопроводящей смазкой, например, vKPT-8, и тщательно прижать модуль к радиатору с помощью втулок (весь этот “ужас” автор попытался изобразить в первой части статьи).

Во имя истины автор должен дополнительно поугадать потребителей модулей. В большинстве случаев Вам не удастся эффективно использовать конвекционный радиатор, который в плане проекции на модуль составляет более 2...3 площади модуля в плане. Ребра или штыри радиатора должны находиться на определенном и, как правило, не маленьком расстоянии друг от друга, кроме того, они не могут быть большой высоты. Все это объясняется объективным нежеланием тепла “добираться до удаленных уголков радиатора”. В результате в рассматриваемом случае, когда площадь основания модуля равна, например, 150 см<sup>2</sup>, не удастся применить конвекционный радиатор с эффективной площадью более приблизительно 2500 см<sup>2</sup>, а это никак не названные выше 5800 см<sup>2</sup>. В большинстве практических случаев обычно не удается конвекционно отвести от малогабаритных модулей более 30...50 Вт тепловой мощности.

При небольших мощностях и не очень миниатюризированных модулях все обстоит прекрасно. Как правило, поверхности корпуса модуля хватает для



решения задачи охлаждения. В качестве поверхности в расчетах Вы можете использовать все грани корпуса модуля. Это объясняется тем, что отвод тепла от доньшка корпуса модуля через материал печатной платы довольно заметен, здесь положительную роль играют и медные выводы модуля вместе с контактными площадками печатной платы.

Ну а что же делать, когда не все прекрасно? Здесь единственным выходом из положения является использование кондуктивного теплоотвода или принудительного охлаждения с помощью вентилятора.

Кондуктивный теплоотвод реализуется при соединении теплоотводящей поверхности корпуса модуля с массивными металлическими (алюминий, медь) элементами конструкции, например, модуль закрепляется на алюминиевой стенке аппаратуры толщиной 3...8 мм и более. Иногда в качестве весьма эффективного кондуктивного теплоотвода применяются тепловые трубы (здесь не рассматриваются). Главное в этом случае, чтобы кондуктивный теплоотвод имел возможность передать тепло от модуля в отдаленные зоны конструкции, где тепло рассеивается тем или иным способом. Довольно элегантно выглядит задняя или боковая стенка аппаратного блока из анодированного алюминия толщиной 4 мм, на которой изнутри закреплены несколько модулей одного профиля, на выводы которых надета аппаратная печатная плата с дополнительными фильтрами, интерфейсными для модулей устройствами, самовосстанавливающимися предохранителями, тепловыми и токовыми датчиками мониторинга системы электропитания, световыми индикаторами и т. п. В такой конструкции удобно (при необходимости функционального наращивания или в случаях ошибок при начальном тепловом проектировании) разместить дополнительный ребристый или штыревой радиатор снаружи, не затрагивая модули, на данной стенке.

Принудительное охлаждение с помощью вентилятора часто используется на практике. Как правило, легко удается уменьшить площадь радиатора,

рассчитанную для конвекционного охлаждения в 2–3 раза при скорости воздушного потока около 0,5...1 м/с. Дальнейшее уменьшение площади радиатора требует точных расчетов и применения мощных вентиляторов. Практически удается довести коэффициент уменьшения площади до 5...7. Крайне осторожно необходимо идти на приводимые в некоторых зарубежных каталогах данные на модули – “8...10 раз” – для этого коэффициента. Эффективны так называемые активные радиаторы, т. е. совмещение в одной конструкции радиатора и вентилятора, как это делается при использовании современных мощных процессоров. Правда, необходимо учитывать, что вентилятор – элемент дополнительной ненадежности и повышенного акустического шума.

Автор особо хотел бы подчеркнуть, что тепловые расчеты конструкций весьма сложны и громоздки. Они становятся доступны, если разработчики имеют достаточное количество исходных данных. Это происходит далеко не всегда, поэтому большое значение здесь имеют эмпирические соотношения.

Не ленитесь. Сделайте вместо модулей пустые алюминиевые коробочки, разместите внутри мощные резисторы, подайте в резисторы необходимую мощность, не забудьте запитать функциональные узлы аппаратуры от лабораторных источников электропитания и “поиграйте” с различными вариантами теплоотводов. Вы можете сэкономить массу ресурсов, вовремя обнаружив, что в Вашем конкретном случае, например, окажется, что вентиляторы должны работать не на вытяжку, а на нагнетание или наоборот.

Предыдущие разделы настолько важны, что автор не может обойтись без выводов, нравочений и советов.

### **ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ОРГВЫВОДЫ**

1. При покупке модулей не гонитесь за очень миниатюрными модулями, не обращайтесь на тысячи Ватт в дм<sup>3</sup>. Помните о сюрпризе маленького карлика. Вполне возможно и даже скорее всего, что модуль большого

размера, кстати, может, содержащий все необходимые фильтры и сервисные системы, потребует в результате меньший по объему радиатор в составе аппаратуры, а суммарно стоимость “модуль + радиатор” (или затраты на систему охлаждения) окажутся значительно меньшими, чем в случае применения “маленького карлика”.

2. Мощный модуль, теплоотводящая поверхность которого выполнена в виде алюминиевой плиты толщиной 4...5 мм предпочтительней по многим показателям, несмотря на то, что его общая толщина может быть больше, чем у миниатюрных низкопрофильных собратьев в тонкостенных корпусах.

3. Не волнуйтесь от цифр наработки на отказ, приводимых в рекламе. Лучше узнайте, при какой температуре они гарантируются.

4. Не поленитесь, раскопайте или измерьте достаточно точные значения КПД модуля, которые он имеет при работе именно в Ваших режимах в составе аппаратуры. Вполне может оказаться, что модуль со скромными значениями КПД при максимальной мощности (и, как правило, недорогой) эффективен для Вашего режима.

5. Знание точного значения КПД и, вследствие этого, точного значения рассеиваемой мощности позволит Вам грамотно поставить и провести тепловые эксперименты. В результате Вам не потребуется спешно переделывать аппаратуру. Автор давно заметил, что ошибки разработчиков (как и продавцов, использующих весы) при тепловых расчетах всегда происходят в одну сторону – в неблагоприятную для потребителя (покупателя) модулей.

6. Главный вывод – помните, что **модульные (в данном случае электропитательные) проблемы отечественных производителей аппаратуры гораздо ближе отечественным производителям модулей, нежели зарубежным.**

### **ПОМЕХИ – КАКАЯ ЖИЗНЬ БЕЗ НИХ**

Пульсации (в общем случае – помехи) – вот что первое спрашивают потребители модулей. И они правы.

Виды пульсаций-помех, методы их измерений, способы уменьшения – все это сказочная поэма, на тему которой любой разработчик модулей может говорить часами. Еще бы, ведь потребитель при упоминании о пульсациях и помехах буквально бледнеет. Ему известно, что из-за больших пульсаций он не пройдет сертификацию, он знает, что пульсации творят безобразия, сбивая работу функциональных узлов. Потребитель модулей уже переживал унижения, когда выслушивал претензии о том, что его аппаратура из-за плохой электромагнитной совместимости делает неработоспособной аппаратуру не менее достойных, чем он сам, смежников и т. д. Автор помнит фразу из уст Главного инженера союзного министерства: “Ваши палки (читай – узкие импульсы пульсаций – помехи) сидят даже на носу ракеты ... тра-та-та...”.

Любой рассматриваемый модуль – импульсное устройство, внутренние элементы которого работают на частотах 20...100...400 кГц и выше. При этом в модуле происходят изменения токов величиной десятки ампер и напряжений величиной десятки и сотни вольт за время, исчисляемое единицами и десятками наносекунд. В результате рождаются импульсные электромагнитные поля, которые наводят во всем окружающем напряжением и токи. А окружающим являются проводники и элементы самого модуля, а также таковые в аппаратуре. Учитывая, что модулю приходится отрабатывать импульсные воздействия входного напряжения и тока нагрузки, имеющие частоты от единиц до сотен Герц, мы имеем широкий спектр помех от модуля, начинающийся от десятков Герц и достигающий сотен МГц. Неприятный, в общем, эффект. Примерно такой же, как выхлопные газы у даже самого хорошего автомобиля.

Формулы, описывающие электромагнитные процессы в модулях, столь же сложны, как и аппаратура, позволяющая точно оценить помехи от модулей. Как правило, дорогостоящие измерения электромагнитной совместимости модулей проводятся один раз на этапе разработки или сертифика-

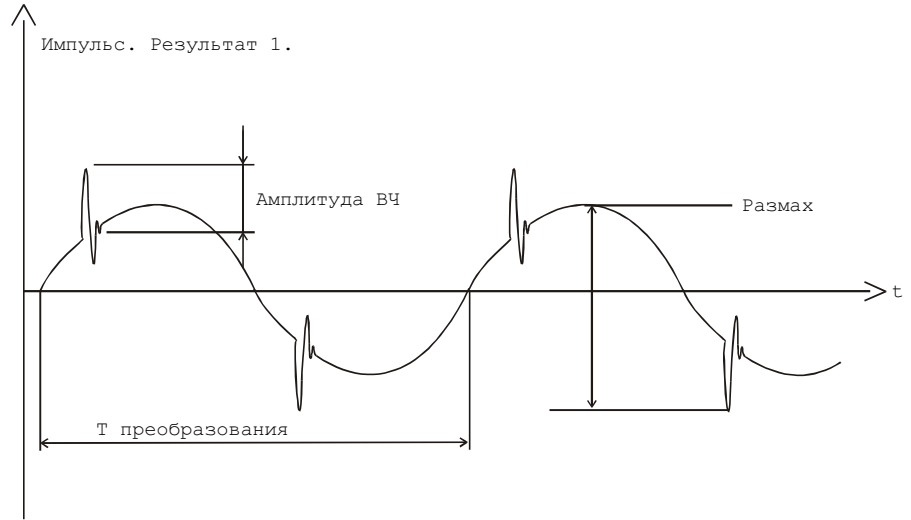


Рис. 5

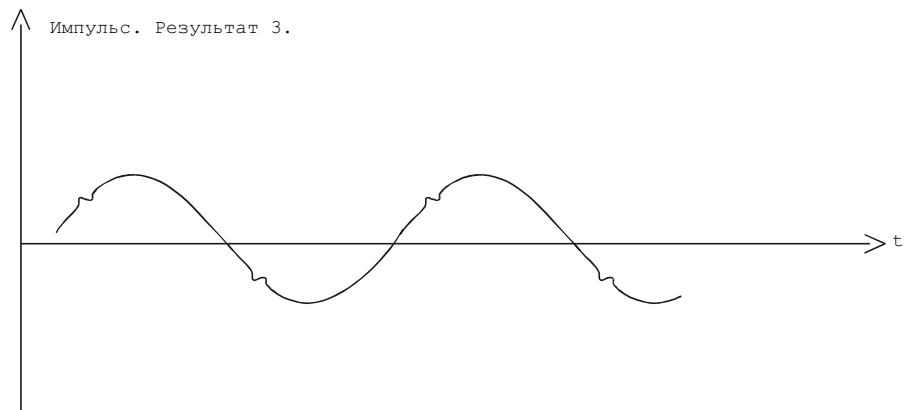


Рис. 6

ции. Однако в повседневной практике разработчикам часто приходится оценивать помеховые характеристики модулей. Каждый из разработчиков имеет свои секреты мастерства. Одни кропотливо мотают на маленьких ферритовых стерженьках нечто подобное магнитным антеннам, другие любят использовать допотопный дедушкин радиоприемник (детекторный!) и т. д. Автор приводит в подарок, без теоретических доказательств и мудрых объяснений, свою любимую методику, позволяющую, по крайней мере, оценивать электромагнитную совместимость одноканальных модулей различных фирм, не теряя чувства юмора и хорошего настроения.

1. Подключите модуль к источнику первичного электропитания (естественно, выключенному!) проводами длиной 1 м каждый. Непосредственно

на входные выводы модуля припаяйте керамический конденсатор емкостью 4,7...15 мкФ для низковольтных сетей (=12В...=60В) или емкостью 0,47...1 мкФ для высоковольтных сетей (=110В, =220В, =350В).

2. Нагрузку к модулю в виде переменных резисторов необходимой мощности, позволяющих задавать ток нагрузки от минимума до максимума, соответствующий реальным значениям тока в аппаратуре, подключите с помощью проводников, длиной не менее 1 м каждый. Непосредственно на выходные выводы модуля припаяйте керамический конденсатор емкостью 4,7...15 мкФ для низковольтного выхода (=3В...=16В) или емкостью 1,5...2,2 мкФ для высоковольтного выхода (=24В...=60В).

3. Специальным образом подготовьте два кабеля осциллографа (сам ос-

циллограф, естественно, должен быть уже давно подготовлен, его полоса пропускания должна быть 20...50 МГц.)

Первый кабель делается просто. Возьмите “лишний” кабель из комплекта к осциллографу и, пока не видит начальник, обрежьте его длинные выводы “под корень”. Конец кабеля разделайте так, чтобы длина центральной жилы и кончик экранирующей оплетки были примерно по 5..10 мм, не более.

Второй кабель “позаимствуйте” потихоньку у товарища по работе (обычно в комплекте кабелей для осциллографа лишних не бывает). Разделайте его точно так же, затем между выводом центральной жилы и выводом экранирующей обмотки распаяйте керамический конденсатор с короткими (2...5 мм) выводами. К выводам этого конденсатора припаяйте два изолированных проводника длиной 30...40 см и слабо свейте их (7...10 перекрещиваний). Свободные концы проводников будут индикаторными.

4. Измерьте с помощью осциллографа и первого кабеля пульсации непосредственно на выходных выводах модуля. На экране Вы увидите типовую картинку пульсаций (рис. 5) с размахом от пика до пика по вертикали 50...100 мВ для низковольтного выхода или 200...400 для высоковольтного выхода. Это первый результат. Здесь необходимо заметить, что в ждущем режиме осциллографа можно “выловить” либо высокочастотную составля-

ющую, соответствующую частоте преобразования в модуле (рис. 5) либо низкочастотную составляющую, это низкочастотные шумы ШИМ-контроллера модуля и остаток подавленной модулем низкочастотной пульсации входного напряжения (обычно 100 Гц). Обычно вторая составляющая для модулей, питаемых от стабилизированного источника, для приведенного режима измерения намного меньше первой и во внимание не принимается.

5. Измерьте с помощью осциллографа и первого кабеля пульсации на любом выходном выводе модуля при закороченных концах кабеля. На экране Вы увидите вторую типовую картинку пульсаций (рис. 6) с определенным размахом от пика до пика. Это второй результат.

6. Повторите действия по п. 4 с кабелем второго типа. Это третий результат.

7. Если у Вас еще остались силы или время до обеда (до окончания работы), не поленитесь – распустите свитые проводники второго кабеля, замените керамический конденсатор на алюминиевый электролитический генерального типа (т. е. обычный) емкостью 100...470 мкФ и повторите измерения по методике п. 4. Это будет четвертый результат.

8. И, наконец, если Вы считаете себя профессионалом, проделайте все вышеизложенное при различных сочетаниях входного напряжения, тока нагрузки и окружающей температуры.

Обычно достаточно иметь от 3 до 5 точек измерения.

Дальше начинается самое интересное.

Если в составе пульсаций первого измерения присутствуют игольчатые импульсы с короткими (20...100 нс) фронтами, Вам нужно насторожиться – лучше бы их не было вообще. Их наличие говорит о широком спектре передаваемых и излучаемых модулем помех. Скорее всего Вы увидите такие же импульсы и во втором результате. Здесь очень важно соотношение амплитуды игольчатых импульсов первого результата к общему размаху пульсаций и соотношение амплитуд игольчатых импульсов первого и второго результата.

В хорошем модуле с высококачественными входными и выходными фильтрами, с хорошо сбалансированными по высокочастотным параметрам импульсной частью и элементами конструкции модуля измеренное значение амплитуды именно игольчатых импульсов в первом результате должно быть в 2...3 и более раза меньше общего размаха высокочастотных пульсаций (рис. 5). Исключением является редкий случай применения модулей с очень хорошим подавлением пульсаций с частотой преобразования. Тогда, несмотря на значительное превышение амплитуды игольчатых импульсов по сравнению с размахом пульсаций от первой гармоники частоты преобразования, хоро-

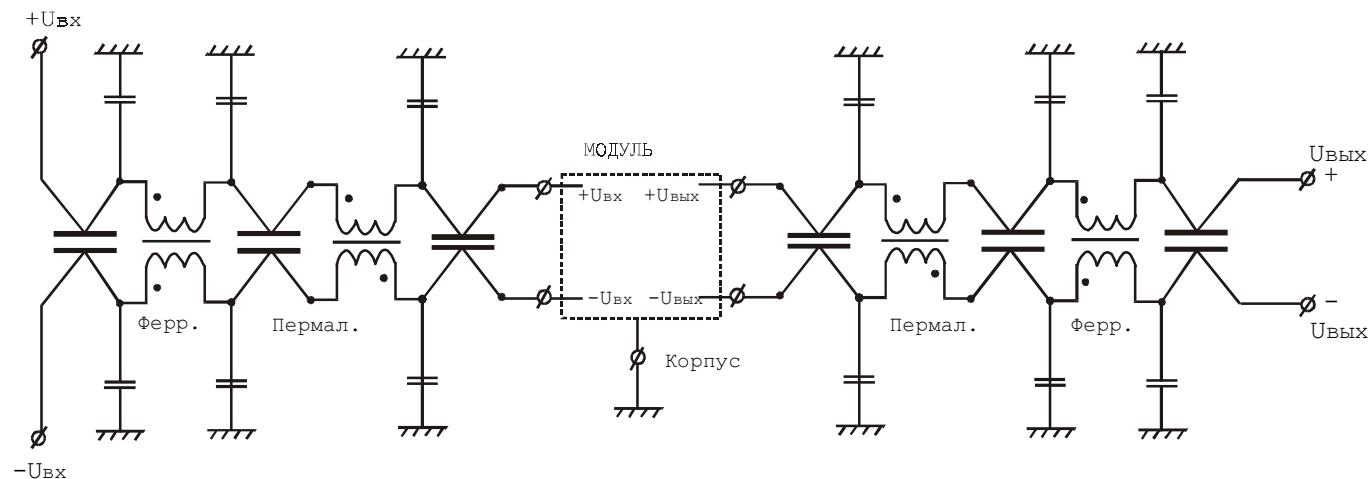


Рис. 7

шим результатом будет случай, когда размах игольчатых пульсаций будет в 2...3 и более раз меньше значений, указанных в п. 4.

Очень хорошо, если кроме положительного результата, описанного в предыдущем абзаце, Вы увидите, что во втором результате амплитуда игольчатых импульсов в 3...5 раз меньше, чем в первом результате.

Третий результат даст Вам реальное значение размаха пульсаций с учетом наведенной составляющей, которое Вы будете иметь в Вашей аппаратуре в цепях электропитания функциональных узлов (рис. 6).

Наконец, практическое совпадение четвертого результата с третьим укажет Вам на очень малое помехоизлучение модуля. Таким модулем можно гордиться, конечно, при условии положительных тестов в первом и втором результате.

Автор должен заметить, что если чувствительные к импульсным помехам с частотами преобразования функциональные узлы расположены вплотную

к модулю (на расстоянии ближе, чем толщина модуля) все предыдущие измерения Вы можете не проводить. Хорошее настроение, скорее всего, Вас покинет, так как независимо от того, какой у Вас модуль или не очень, придется заняться очень неприятными вопросами многослойного экранирования (хорошо, если сразу будет известно что и как экранировать). Давать здесь советы автор не рискует.

В большинстве случаев полученные Вами результаты будут классифицированы между удовлетворительными и менее удовлетворительными (плохими). Не отчаивайтесь, попытайтесь использовать частично или в полной мере приведенную на рис. 7 схему включения модуля в составе системы электропитания. В качестве керамических конденсаторов лучше всего с позиций электромагнитной совместимости использовать безвыводные конденсаторы типа K10-47в групп M1500, H30. В качестве ферритовых и пермаллоевых – сердечники из материалов M1500HM, M2000HM, M3000HM и

МП60, МП100, МП140 соответственно. Конечно, важно, чтобы Ваши конструкторы не были новичками в проектировании аппаратуры с импульсными блоками электропитания.

Итак, главное.

**Если у Вас сжатые сроки проектирования, быстрая сменяемость аппаратуры и Вам не хочется рисковать, – использование готовых унифицированных модулей электропитания, приобретаемых у официальных дистрибьюторов специализированных фирм, производящих такие модули большими сериями, является весьма выгодным решением, позволяющим экономить Ваши ресурсы и повышать конкурентоспособность Вашей аппаратуры.**

В заключение хотелось бы предложить – если изложенное показалось Вам полезным: пишите в редакцию, автор готов к продолжению разговора на тему энергетической электроники.

**alecsan@online.ru**