

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-

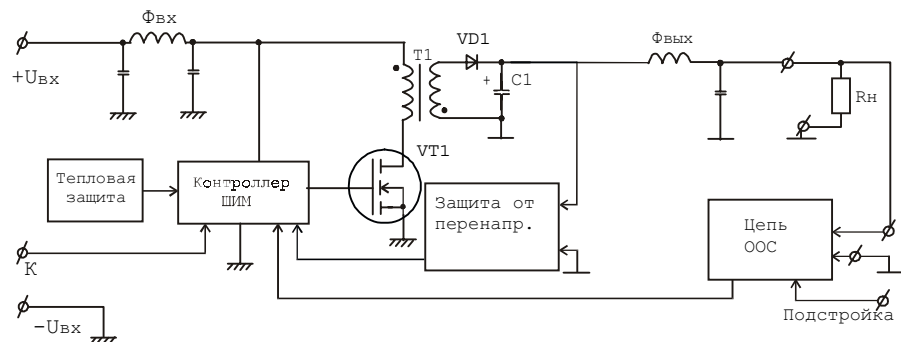


Рис. 1

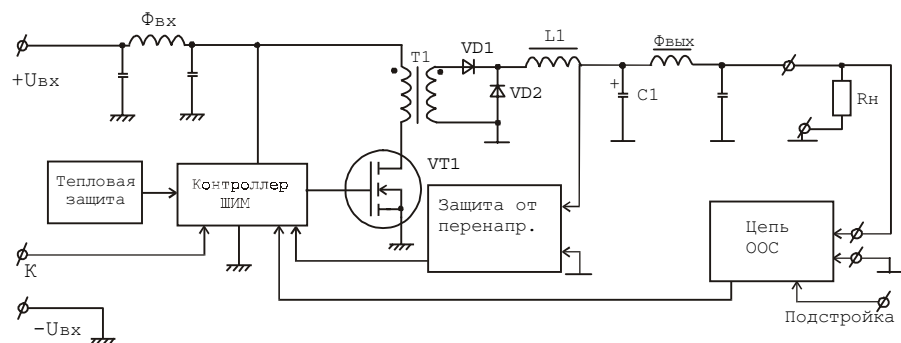


Рис. 2

водители 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

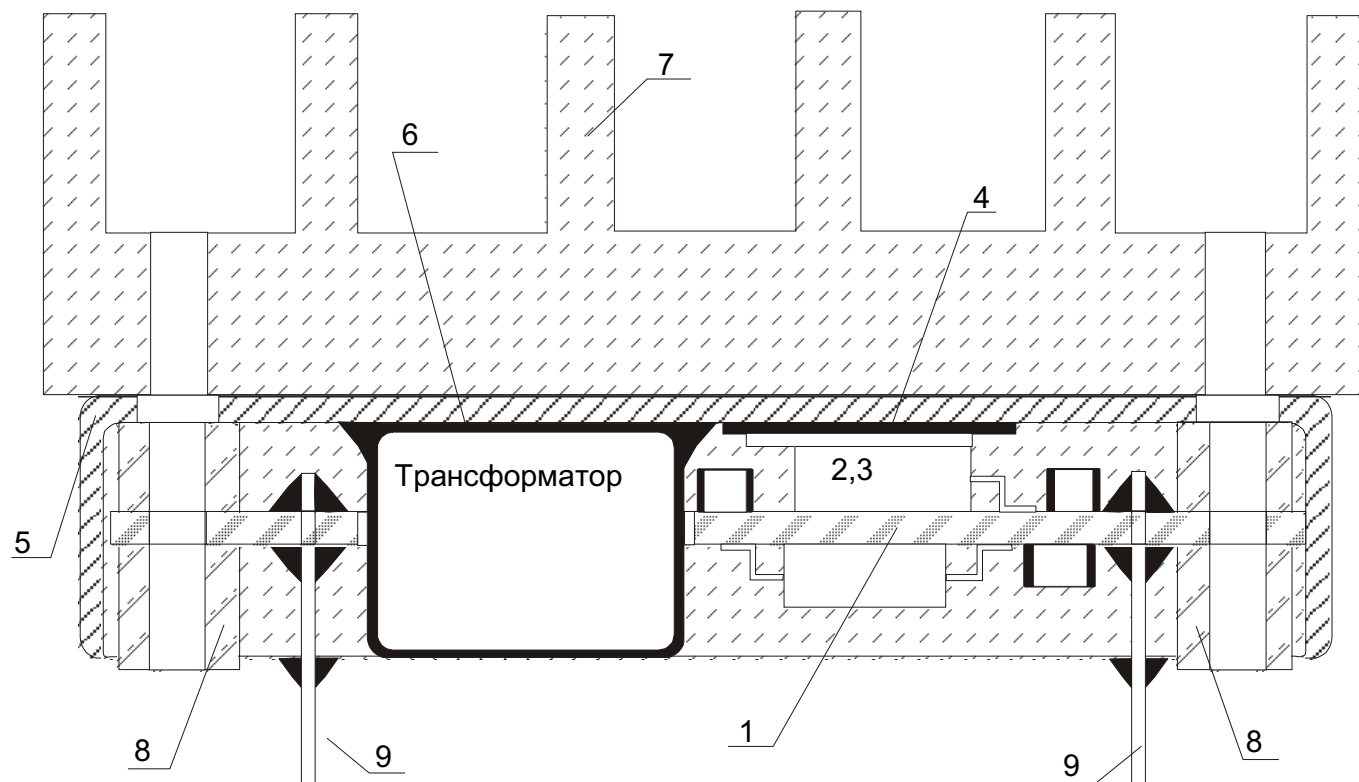


Рис. 3

(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