

Обеспечивающие технологии электроники: охлаждение встроенных систем

Антон Реут (Москва)

В статье представлен обзор стандартов и технологий активного и пассивного охлаждения встроенных систем на основе кондуктивного теплоотвода.

Несомненно, температура является одним из основных факторов «жесткости» условий эксплуатации компьютерных систем. Управление тепловым режимом является важнейшим условием обеспечения их работоспособности. Проблемы создания оптимальных тепловых режимов усугубляются постоянным ростом тактовых частот процессоров и других микросхем и необходимостью минимизации габаритов аппаратных платформ.

Работа встроенных систем в составе оборудования в условиях жестких эксплуатационных воздействий и в не обслуживаемом (дистанционно управляемом) режиме, как правило, усложняет поддержание штатного теплового режима. При этом технические решения для поддержания тепловых режимов встроенных систем должны учитывать требования к длительности жизненного цикла оборудования, его надежности, а также ограничения на допустимую стоимость. Тем не менее, использование моделирования, специальных технологий и конструкций позволяют отводить от активных и пассивных элементов большие тепловые потоки.

Базовыми технологиями отвода тепла от компьютерной системы являются активное охлаждение (например, потоком воздуха или за счет орошения испаряющимся хладагентом) и т.н. пассивный кондуктивный теплоотвод за счет процесса «естественной» теплопроводности. Кавычки напоминают, что «естественной» теплопроводностью можно управлять; об этом будет сказано ниже.

Упомянутые технологии отвода тепла могут использовать четыре способа управления тепловым режимом встроенной системы:

- активное охлаждение на уровне каждой платы;

- сочетание активного охлаждения системной среды (атмосфера и конструктив корпуса) и пассивного кондуктивного теплоотвода на уровне плат;
- пассивный кондуктивный теплоотвод на уровне плат и системы в целом;
- охлаждение за счет естественной конвекции без использования обдува потоком воздуха.

Активное охлаждение с использованием внешнего теплоносителя – самый эффективный метод отвода тепла, однако весьма сложный с точки зрения конструктивной реализации, неблагоприятный с точки зрения надежности и дорогой в исполнении. Системы активного охлаждения неизбежно увеличивают общие габариты и массу встроенной системы, а также ее энергопотребление.

Пассивный кондуктивный теплоотвод организуется на основе естественной теплопроводности по специально сформированным каналам отвода тепла. Это могут быть включения металла с повышенной теплопроводностью или металлические трубки с жидким теплоносителем. В каналы отвода тепла, как правило, входят области специально сформированных контактов двух и более металлических деталей системы кондуктивного охлаждения, зачастую выполняющих еще и функции механического упрочения и защиты от электромагнитного излучения.

Технологии кондуктивного теплоотвода на основе естественной теплопроводности по специально сформированным каналам отвода тепла требуют высокой квалификации разработчиков встроенных систем и тщательной проработки конструкции, что может повлечь за собой удорожание встроенной системы и увеличение сроков ее разработки. Однако грамотная система кондуктивного теплоот-

вода не только не ухудшает надежность встроенной системы, но может повысить ее, не создавая дополнительного энергопотребления.

Выбор подхода к управлению тепловым режимом встроенной системы может диктоваться как объективными инженерными предпосылками, так и специальными требованиями заказчика, принятыми в конкретных отраслях промышленности. Военные «не любят» вентиляторы, а повышенные требования к производительности некоторых современных приложений требуют тщательного конструирования систем каналов пассивного кондуктивного отвода тепла.

В то же время можно найти ряд примеров из области современной бытовой техники, когда встроенные системы на основе микроконтроллеров с низким энергопотреблением, широко использующих в конкретных приложениях режимы «сна» и «ожидания», легко обходятся охлаждением за счет естественной конвекции, без обдува потоком воздуха.

В промышленных компьютерах охлаждение за счет естественной конвекции тепла может использоваться при тепловыделении не более 15 Вт для модулей форм-фактора 6U VME и около 12 Вт для модулей форм-фактора 3U CompactPCI (по данным компании Kontron).

Система активного охлаждения на уровне каждой платы используется в том случае, когда тепловыделение платы может быть описано «точной» моделью источников тепла, если на плате можно выделить одну-две микросхемы, на которые приходится основное тепловыделение.

По сравнению с подходом на основе активного охлаждения на уровне каждой платы, сочетание активного охлаждения системной среды и пассивного кондуктивного теплоотвода на уровне плат позволяет (теоретически) повысить надежность системы и снизить ее энергопотребление за счет снижения числа вентиляторов. Естественно, за это придется заплатить деньгами и временем, потраченными на прора-

ботку как конструкции системы кондуктивного теплоотвода на уровне плат, так и архитектуры активного охлаждения системной среды. Для иллюстрации последнего утверждения можно привести пример корпусов формата Cube некоторых систем стандарта MicroTCA (см. рис. 1). Форм-фактор Cube оказался удобным для оптимизации системы воздушного охлаждения, работающей таким образом, что в потоке воздуха находится максимум два АМС-модуля, а не три-четыре, как это бывает в системах с другими формами корпусов.

Для встроенной системы можно организовать не слишком сложную систему пассивного кондуктивного теплоотвода, когда требования приложения можно удовлетворить при достаточно низком энергопотреблении, ограничения на габариты и массу встроенной системы не являются слишком строгими, а температура окружающей среды не возрастает до экстремальных значений. При ужесточении требований придётся использовать сочетание активного охлаждения системной среды (атмосфера и конструктив корпуса) и пассивного кондуктивного теплоотвода на уровне плат.

Кондуктивное охлаждение

Современные промышленные компьютеры (встраиваемые системы) и одноплатные компьютеры, являющиеся макрокомпонентами для их создания, внешне напоминают изделия машиностроительного производства (см. рис. 2). Такое конструктивное исполнение связано с отказом от использования активных систем охлаждения в виде вентиляторов и, тем более, систем на основе жидкостного охлаждения или охлаждения за счёт испарения специального хладагента.

Сегодня разработчики одноплатных и промышленных компьютеров достигли серьёзных успехов в конструировании встроенных систем, использующих исключительно кондуктивный принцип охлаждения и естественную теплопроводность. Тепло отводится от микросхем в специальный механический конструктив и далее в корпус встроенной системы и/или в слой металлизации платы, а оттуда – в специальный конструктив или сразу в корпус промышленного компьютера и затем в окружающую среду.



Рис. 1. MicroTCA-система OM6120 в крейте формата Cube

Для повышения теплопроводности в промышленных компьютерах многоплатных модульных конструкций (CompactPCI, VPX, MicroTCA) используются специальные заклинивающие элементы крепления модулей в слотах, которые развивают давление, прижимающее охлаждающие пластины к конструктиву (эффективность теплопередачи между прижатыми друг к другу металлическими элементами пропорциональна давлению).

В промышленных компьютерах на основе материнских плат в промышленном исполнении крепёжные отверстия выполняются таким образом, чтобы винтовое крепление плотно и на достаточной площади обеспечивало соприкосновение металлических поверхностей корпусного конструктива компьютера и слоя металлизации платы, используемого для теплоотвода.

Принципы проектирования одноплатных компьютеров и других модульных компонентов для встроенных систем были обобщены в 1992 г. в стандарте IEEE 1101.2 (Базовые рекомендации к механическому конструктиву модулей формата Eurocards с кондуктивным охлаждением). Стандарт, в частности, рекомендует технологии формирования каналов отвода тепла от модулей форматов VMEbus и CompactPCI в шасси по обратной стороне печатных плат и через рамки держателей модулей. При проектировании печатных плат рекомендуется предусматривать встраивание в их топологию проводящих линий, по которым тепло отводится к кромкам плат (см. рис. 3), а также обрамление печатных плат теплопроводящей металлической рамкой, контактирующей с системным крейтом (см. рис. 4).

Принятие стандарта IEEE 1101 создало предпосылки для производства совместимого оборудования разными фирмами и позволило обобщить отраслевой опыт, обратив внимание на важные изменения в энергопотреблении компонентов на плате. Считается, что основной вклад в высокий уровень теплового рассеивания модулей для встраиваемых применений дают микропроцессоры. При таком предположении в качестве средства борьбы с



Рис. 2. Внешний вид одноплатного компьютера ITC-320 форм-фактора 3U CompactPCI



Рис. 3. Теплопроводящая окантовка, проходящая по границе печатной платы [2]

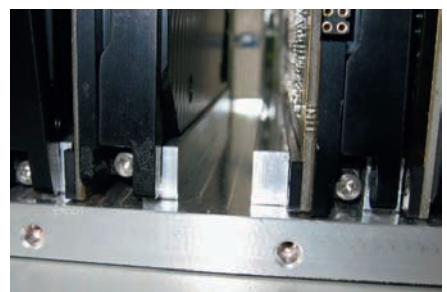


Рис. 4. Тепловой контакт металлической рамки, обрамляющей печатную плату встраиваемого модуля, с системным крейтом [2]

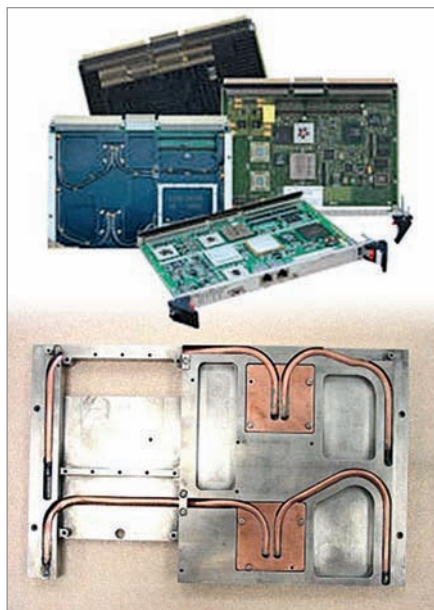


Рис. 5. Конструктивный элемент технологии Heat Pipes на основе трубок с теплоносителем

тепловыделением рассматриваются технологии «точечного» охлаждения.

Однако в современных COTS-модулях тепло выделяют многие компоненты конструкции: микросхемы памяти DDR2, XDR или QDR, программируемой логики (ПЛИС/FPGA), цифровые сигнальные процессоры (ЦСП), ИС последовательных интерфейсов, приборы вторичного питания. Это означает, что система поддержания теплового режима модуля в штатном режиме должна обслуживать все эти микросхемы и полупроводниковые приборы. Поэтому в стандарте IEEE 1101.2 рекомендуется использовать пластину-«холодильник», собирающую тепло от многих компонентов и отдающую тепло через салазки по нижней стороне платы.

Сегодня может использоваться ещё и пластина-«холодильник», контактирующая с верхней стороной печатной платы модуля и с теплоотводящими элементами шасси. Дело в том, что в период 1970–90-х гг. многие интегральные микросхемы с большим тепловыделением конструировались таким образом, чтобы тепловой поток был направлен вниз, к основанию микросхемы, и отводился через выводы ИС в печатную плату, а оттуда – за её пределы. Этим и определялась рекомендация по расположению пластины-«холодильника» в стандарте IEEE 1101.2.

С середины 1990-х ситуация с направленностью тепловых потоков от микросхем изменилась: теперь их конструкция предусматривала направление теплового потока вверх, в сторону крышки корпуса ИС. На это

обращают внимание специалисты компании Mercury Computer Systems [1]. Тепловой поток в ИС, направленный от платы, существенно затрудняет эффективное управление тепловым режимом модуля встроенной системы на основе технологий охлаждения, построенных на стандартах предыдущего поколения. Если же обеспечить тепловой контакт крышек корпусов ИС и пластины-холодильника, можно, минув плату, сократить путь отвода части тепла. Такую рекомендацию содержит, в частности, стандарт VITA 48 «Ruggedized Enhanced Design Implementation» (Улучшенная технология конструктивного повышения устойчивости к неблагоприятным условиям внешней среды).

Помимо стандартов IEEE 1101 и VITA 48 существуют и другие стандарты, обобщающие опыт создания систем и приёмов кондуктивного охлаждения модульных промышленных компьютеров. Со спецификацией VITA 48 тесно связан стандарт ANSI/VITA 47-005 (Встраиваемые модули: учёт особенностей внешней среды, проектирование и особенности конструкций, безопасность и качество). Спецификация ANSI/VITA 20-001 содержит рекомендации, которые следует учитывать при разработке мезонинных PMC-модулей с кондуктивным охлаждением и их модулей-носителей.

Наличие стандартных рекомендаций не исключает использования оригинальных решений.

Так, компания Thales Computers/CEPTA более 10 лет назад разработала собственную технологию теплоотводящего конструктива Ruggedizer, позволяющую реализовать в варианте встроенной системы компьютерные платформы на основе четырёх процессоров PowerPC. Эта же компания разработала технологию Heat Pipes, применяемую в конструкции системы охлаждения модулей PowerNode5 на основе 64-разрядной двухпроцессорной платформы PowerPC. На рисунке 5 приведено изображение конструктивных элементов технологии Heat Pipes. Её тепловые интерфейсы к обеим сторонам платы на основе трубок с теплоносителем имеют более высокую теплопроводность, чем просто металлические пластины, и лучший тепловой контакт с областями повышенного тепловыделения. Специальная конфигурация расположения и формы теплоотводящих трубок компенсируют

возможное влияние ускорений, испытываемых оборудованием.

Ещё одним примером фирменной технологии является экран BrainCAP, разработанный компанией Kontron для COM-модулей стандарта E2Brain на основе процессоров с RISC-архитектурой. Эти модули имеют специфичный набор интерфейсов, нестандартный для конструкции модулей на базе CISC-процессоров.

Концепция управления тепловым режимом модулей E2Brain основывается на полном отказе от активной системы охлаждения на основе вентиляторов и обеспечении температурного режима модуля как единой конструкции. Спецификация E2Brain предусматривает стандартные профили элементов экрана BrainCAP и стандартную технологию крепления. Радиатор модуля E2Brain отбирает тепло от процессора и других компонентов с повышенным тепловыделением, передаёт их в экран BrainCAP, который и рассеивает тепло в элементы шасси и окружающее пространство. Помимо функций теплового экрана, алюминиевые элементы, входящие в конструкцию BrainCAP, обеспечивают дополнительное механическое упрочнение модуля, а также защиту от электромагнитного излучения.

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОТОВОДА

При разработке принципов кондуктивного охлаждения модуль для встраиваемых систем или материнскую плату для промышленных применений удобно представлять в виде набора тепловых слоёв, по которым тепловой поток проходит снизу вверх или от центра к периферии. Источниками тепла являются микросхемы, тепло от их кристаллов отводится в корпуса, теплопроводящие свойства которых определяются производителем. Приёмником тепла является окружающая среда, тепловые свойства которой определяются условиями эксплуатации системы. Задачей разработчика системы кондуктивного охлаждения является выбор комбинации тепловых слоёв и создание эффективных тепловых интерфейсов между ними.

В простейшем случае технология точечного охлаждения использует локальные металлические радиаторы. Как правило, они выполняются из алюминия, или меди, или комбинации

этих металлов и могут иметь как простую, так и достаточно причудливую конструкцию.

Если тепловыделение источника обусловлено многими компонентами, то часто используется система выравнивания градиента температур в виде алюминиевой пластины, находящейся в тепловом контакте с компонентами с большим тепловыделением. Для улучшения теплового контакта может применяться специальная теплопроводящая паста. В пластине, как правило, предусмотрены отверстия над выступающими компонентами, поскольку разработка системы кондуктивного теплоотвода проводится с учётом ограничений на габариты встраиваемой системы в целом. Для улучшения отвода тепла можно применить металлическое основание, с которым в тепловом контакте будет находиться нижняя сторона платы.

В ряде случаев для завершения конструкции системы охлаждения на основе системы выравнивания градиента температур и металлического основания достаточно реализовать тепловой контакт этих элементов с шасси встроенной системы. Его обеспечивает специальная защёлка рамки (держателя модуля), которая жёстко фиксирует его в слоте и одновременно обеспечивает улучшение теплового контакта в теплоотводящих каналах, сформированных совокупностью механических элементов. В качестве фиксатора модуля может выступать и винтовое соединение, которое также выполняет две функции – закрепление и улучшение теплового контакта. Если системы выравнивания градиента температур и металлического основания недостаточно для эффективного отвода тепла, то к пластине может прикрепляться дополнительный радиатор.

Следует отметить, что проектирование системы кондуктивного теплоотвода может рассматриваться как первый этап формирования системы принудительного охлаждения. Успешное проведение этого этапа может снизить стоимость и мощность системы принудительного охлаждения. В тех случаях, когда кондуктивного теплоотвода недостаточно, дополнительный механический конструктив, устанавливаемый на одноплатные компьютеры (это могут быть как изделия относительно больших габаритов, таких как у форм-факторов 6U/3U CompactPCI или VPX, так и модули класса

SFFB или Small Form Factor Boards, компактные процессорные модули), улучшает возможности активного охлаждения встроенной системы (материнской платы промышленного компьютера). Этот узел выполняет предварительное выравнивание градиента температур и формирует структуру, удобную для управления потоком воздуха. Использование металлического конструктива, «обёртывающего» плату, позволяет создать вблизи её поверхностей избыточное давление, а специально подобранный рельеф конструктива оптимизирует обтекание воздушным потоком.

Подготовить встраиваемую компьютерную систему к работе в условиях экстремальных температур можно по-разному. В одних случаях такая стойкость закладывается ещё на стадии разработки, когда в них предусматриваются элементы, позволяющие в дальнейшем адаптировать систему к особым требованиям. Это могут быть дополнительные крепёжные отверстия для установки теплоотводящих конструкций или специальное размещение компонентов на поверхности печатной платы.

В других случаях происходит адаптация к неблагоприятным температурным факторам т.н. COTS-изделий «коммерческого уровня» при помощи дополнительных элементов, например теплоотводящих экранов.

Устойчивость к жёстким температурным условиям эксплуатации, заклады-

ваемая на стадии разработки, формируется за счёт:

- подбора микросхем, способных работать в расширенном диапазоне температур, и их специального размещения на печатной плате;
- создания каналов для отвода тепла за счёт естественной теплопроводности (элементы, формирующие теплоотводящие каналы, одновременно могут повышать жёсткость конструкции).

Одним из примеров устойчивости к жёстким температурным условиям эксплуатации, закладываемой на стадии разработки, является система отвода тепла в конструкции материнской платы Kontron KT780/ATX. Одной из её отличительных черт является оптимизация архитектуры системы охлаждения. Гребни радиатора для отвода тепла от «северного» моста на плате KT780/ATX крупнее по сравнению с конструкцией радиатора материнской платы для потребительских компьютерных систем. Более того, этот радиатор может быть при необходимости снят с платы и заменён системой кондуктивного теплоотвода и охлаждения на основе массивной сплошной конструкции коробчатого типа.

Источником тепловыделения на материнской плате, требующим особого внимания, является система подачи и разводки питания. В отличие от изделий для потребительских приложений, эта система на базовой материнской плате Kontron KT780/ATX также снаб-



Рис. 6. Корпус CPCI Rack для создания систем с кондуктивным охлаждением на базе форм-фактора 3U CompactPCI



Рис. 7. Одноплатный компьютер F50C для использования в корпусе CPCI Rack

жена радиатором, повышающим эффективность отвода тепла. Чтобы при использовании платы KT780/ATX в системе с принудительным воздушным охлаждением поток воздуха, направляемый на термонагруженные участки платы, не встречал сопротивления, слоты для подключения модулей расширения расположены на периферии KT780/ATX.

СИСТЕМА КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОТВОДА КАК ЭЛЕМЕНТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО «РАГГЕДИЗАЦИИ» ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ

Выше упоминалась множественность факторов «жёсткости» условий эксплуатации компьютерных систем. Довольно распространённым требованием к встроенной системе является её устойчивость к экстремальным внешним воздействиям, или «раггедизация» (от англ. ruggedize – упрочнять).

Для обеспечения работоспособности в жёстких условиях эксплуатации используются технологии управления тепловым режимом; предусматриваются специальные упрочняющие конструктивные элементы; для защиты

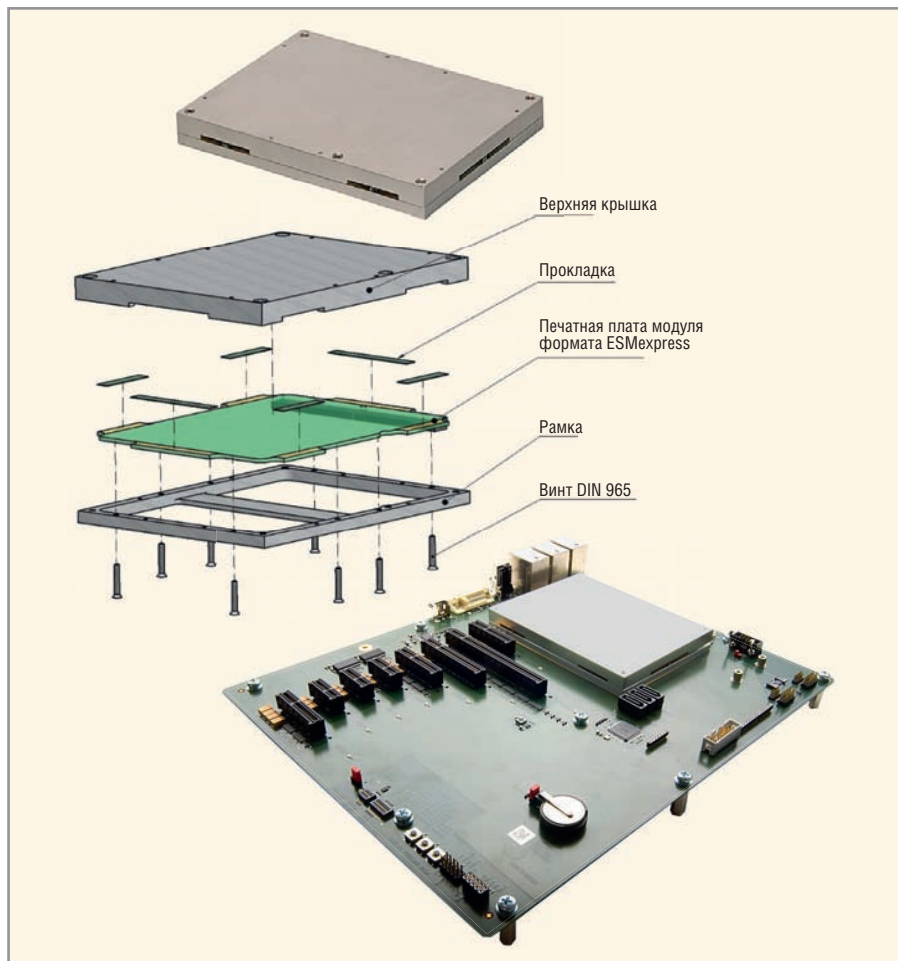


Рис. 8. Модуль ESMexpress в алюминиевом кожухе

от влажности и электростатического электричества применяются различные покрытия и технологии герметизации. Печатные платы конструируются таким образом, чтобы температурные «уходы» топологии размещённых на них проводников и компонентов не повлияли на конечную работоспособность.

При использовании корпусов (крейтов), ограждающих размещённые в них модули от воздействия неблагоприятных факторов, удаётся создавать интегрированные системы в таких конструктивах, которые при установке в них «коммерческих» вариантов COTS-модулей успешно проходят испытания в расширенном диапазоне температур. Однако наилучшие результаты достигаются при одновременной оптимизации конструкции модуля и крейта для работы в расширенном диапазоне температур.

В качестве примера можно привести новую концепцию конструкции корпуса (CPCI Rack) для создания систем с кондуктивным охлаждением на базе форм-фактора 3U CompactPCI (3U CPCI) компании MEN Mikro Elektronik. Новое решение (см. рис. 6) позволяет

использовать в режиме кондуктивного охлаждения модули формата 3U CompactPCI, разработанные для работы в условиях конвективного охлаждения в температурном диапазоне -40...+85°C.

Следует отметить, что охлаждение модулей формата 3U осуществлять проще, чем модулей формата 6U. В случае кондуктивно охлаждаемых изделий отвод тепла осуществляется через металлические рамки держателя печатной платы, соприкасающиеся с конструктивом крейта. И для модулей формата 6U CPCI, и для модулей формата 3U CPCI линейный размер области соприкосновения составляет 160 мм. Однако меньший вертикальный габарит модулей формата 3U снижает тепловое сопротивление для отводимого потока тепла. Последнее свойство обеспечивается специальным конструктивом (см. рис. 7).

Изображённый на рисунке 7 модуль – это одноплатный компьютер F50C на основе процессора MPC8548. Однако в таком же конструктивном исполнении могут использоваться и модули F14 – F18 семейства 3U CompactPCI Intel Family, на которых устанавливаются процессоры фирмы Intel (от Celeron M до Core 2 Duo).

Новый корпус CPCI Rack компании MEN Mikro Elektronik имеет габариты 200×350×145 мм и массу 4,4 кг. Созданные на его основе системы способны противостоять ударным нагрузкам до 15g/11 мс и синусоидальным вибрациям 2g/10...150 Гц. В нём устанавливается трёхслотовая объединительная панель, конструкция которой отвечает спецификациям CompactPCI Spec. 2.0 Rev. 2.1 и IEC 61 076-4-101. Для подключений извне могут использоваться четыре разъёма стандарта MIL-C-38999, для пользовательских целей отведено 57 контактов ввода/вывода. На вход панели подаётся номинальное напряжение 24 В постоянного тока (9...36 В), преобразуемое в напряжения питания 5 и 3,3 В общей мощностью 35 Вт.

Упоминание об «общей» стойкости систем на основе CPCI Rack компании MEN Mikro Elektronik к жёстким условиям эксплуатации уместно и в связи с тем, что дополнительный теплоотводящий механический конструктив создаёт вокруг платы «экзоскелет», который улучшает её стойкость к ударным и вибрационным нагрузкам. Механический конструктив в виде герметичного металлического кожуха выполняет, наряду с функциями теплоотвода, ещё и функции защиты от внешней пыли или тумана, а также экрана, поглощающего электромагнитные излучения и защищающего изделие от электростатического электричества.

Последний аспект тесно связан с темой двухуровневого обслуживания (two-level maintenance/2LM), которое за рубежом стало обязательным в специальных программах вместо т.н. трёхуровневой схемы обслуживания (three-level maintenance/3LM). Сервисная схема 2LM предполагает замену в полевых условиях не всей встроенной системы, а только её отдельного модуля. Важным аспектом двухуровневой модели обслуживания является надёжное соблюдение требований защиты заменяемого модуля от электростатического электричества.

Примером комбинирования практически всех функций стойкости к неблагоприятным условиям эксплуатации в одном элементе являются модули SFFB-модули фирменных стандартов ESMexpress и ESMini. Оба упомянутых типа модулей COM Express устойчивы к неблагоприятным температурным, ударным и вибрационным воздействиям, а также соответствуют жёстким требованиям электромагнитной сов-

местимости. Они спроектированы с учётом рекомендаций стандарта ANSI-VITA 59, RSE Rugged System-On-Module Express (модули класса System-On-Module (SOM) с поддержкой технологии PCI Express, предназначенные для жёстких условий эксплуатации). SOM и COM – это синонимы, обозначающие полнофункциональные одноплатные компьютеры со стандартной системой коммуникаций и ввода/вывода, предназначенные, как правило, для работы с платой-носителем, на которой размещаются специализированные интерфейсы.

Общим для модулей семейств ESMexpress и ESMini является их приспособленность для использования в вентиляторных системах. В конструкцию модулей введён алюминиевый корпус – кожух, который изолирует электронные компоненты на плате от окружающей среды. При необходимости повышения эффективности теплоотвода используются дополнительные конструктивные элементы для выравнивания градиента температур вблизи электронных компонентов и улучшения отвода тепла в конструктив встроенной системы и в корпус оборудования в целом. Кроме механической защиты и теплоотвода, алюминиевый кожух обеспечивает защиту от электромагнитного излучения. После установки COM-модуля на плату носителя осуществляется герметизация кожуха по всем шести поверхностям. Общее представление о конструктиве для

«раггедизации» модулей ESMexpress можно получить на рисунке 8.

Жёсткое винтовое соединение обеспечивает хороший тепловой контакт между платой и теплоотводящими элементами. Если условия эксплуатации требуют дополнительных мер по организации теплоотвода, то корпус, закрывающий модуль, может быть снабжён радиатором или подключён тепловыми трубками к дополнительным элементам рассеивания тепла. При этом алюминиевый корпус всегда обеспечивает 100-% защиту от электромагнитных помех. Винтовое крепление к плате-носителю (8 винтов) обеспечивает высокую стойкость интегрированной системы к вибрационным и ударным нагрузкам.

Освоение технологий повышения стойкости встроенных систем к неблагоприятным внешним воздействиям прошло большой путь. И сегодня, благодаря накопленному в этой области опыту, можно адаптировать к жёстким условиям эксплуатации ноутбуки, мобильные компьютеры всех классов, а также мобильные телефоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. A VITA Based Framework for Ruggedized COTS Electronics with Emphasis on Liquid Cooling – VITA 48 (REDI). <http://www.mc.com/mercury.aspx?id=1870&terms=VITA>.
2. *Schaadt D.* Conduction Cooled Assembly (CCA) Solutions for Standard Boards. http://www.menmicro.com/docs-ext/expertise/pdf/thermal_management_article56.pdf.

