

УДК 681.3:621.396.017:536.27

Ю.Е. Николаенко

Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов

Проанализированы известные решения отвода теплоты от съемных модулей ЭВМ к охлаждающей жидкости, предложены обобщенные типичные схемы и пути их совершенствования. Разработаны новые перспективные схемные решения на основе коллекторных тепловых труб. Приведены результаты экспериментального исследования макета секции коллекторной тепловой трубы, позволяющие определить максимально допустимую мощность тепловыделения охлаждаемых элементов модуля.

The known decisions of heat rejection from removable modules of a computer to the cooling liquid are analyzed, and the generalized typical schemes and ways of their improvement are suggested. New promising schematics are designed on the basis of collector heat pipes. Results of experimental examination of a model of a collector heat pipe section are given which permit of determining the maximum permissible power of heat release of cooled devices of the module.

Проаналізовано відомі рішення відводу теплоти від знімних модулів ЕОМ до охолодної рідини, запропоновано узагальнені типові схеми і шляхи їхнього удосконалювання. Розроблено нові перспективні схемні рішення на основі колекторних теплових труб. Наведено результати експериментального дослідження макета секції колекторної теплової труби, що дозволяють визначити максимально допустиму потужність тепловиділення охолоджуванних елементів модуля.

Введение. Электронно-вычислительная машина (ЭВМ) с энергетической точки зрения – преобразователь потребляемой электрической энергии в энергию полезных сигналов и тепловую энергию потерь. Поскольку тепловая энергия выделяется непосредственно в элементах ЭВМ, она приводит к их перегреву. По мере совершенствования элементной базы и принципов построения ЭВМ разработчикам приходится постоянно сталкиваться с проблемой снижения отрицательного влияния тепловыделений на надежность работы ЭВМ.

При конструировании ЭВМ необходимо обеспечить ее нормальный тепловой режим, при котором температура всех элементов в заданных условиях эксплуатации не будет выходить за пределы, указанные в техническом задании. Это достигается выбором и применением тех или иных средств охлаждения в конструкции ЭВМ.

Постановка проблемы и ее связь с практическими задачами

Современные и перспективные средства высокопроизводительной вычислительной техники и управления реализуются на основе сотен и даже нескольких тысяч серийно выпускаемых микропроцессоров [1, 2]. При проек-

тировании ЭВМ и систем на процессорных элементах и интегральных микросхемах широко используется модульный принцип построения аппаратуры [3–5], при котором функционально законченные электронные модули проектируют в виде печатной платы с установленными и распаянными на ней интегральными микросхемами и микропроцессорами. При повышенной плотности компоновки электронных элементов на печатной плате и преимущественном использовании в качестве элементной базы больших и сверхбольших интегральных схем, самых современных высокопроизводительных процессоров [1, 6, 7] значительно возрастает количество теплоты, рассеиваемой в процессе работы функционального модуля, что приводит к повышению температуры элементов и снижению надежности работы модуля. Кроме того, для обеспечения помехоустойчивости сложных многоканальных вычислительных систем и комплексов желательно обеспечить одинаковую температуру электронных компонентов однотипных каналов. В связи с этим проблема отвода теплоты от электронных элементов функциональных модулей ЭВМ по мере совершенствования элементной базы становится все более

острой, а элементы теплоотвода – неотъемлемыми элементами средств вычислительной техники и управления.

Анализ известных путей повышения эффективности теплоотвода от модулей ЭВМ и нерешенные вопросы

С целью обеспечения нормального теплового режима электронных элементов (микропроцессоров, интегральных схем и других активных элементов) в состав функциональных модулей с повышенным тепловыделением включают специальные элементы и устройства, предназначенные для отвода теплоты, например металлические подложки печатных плат, теплопроводные шины, индивидуальные радиаторы (иногда даже вместе с вентилятором), термоэлектрические модули и т.д. Металлические подложки [8] способствуют выравниванию температуры элементов на печатной плате модуля. Металлические шины [9], устанавливаемые на плате непосредственно под теплоотдающим основанием элементов, отводят от них теплоту к периферийным охлаждаемым поверхностям модуля. Индивидуальные радиаторы с вентиляторами (кулеры) [10] используют для охлаждения наиболее нагретых отдельных элементов на плате, чаще всего мощных процессоров. Термоэлектрические модули [11] используют для поддержания температуры элементов постоянной на заданном уровне, как правило, на уровне ниже температуры окружающей среды. В последние десятилетия широко применяют в качестве элементов теплоотвода двухфазные теплопередающие элементы (тепловые трубы и термосифоны), работающие с использованием замкнутого испарительно-конденсационного цикла теплоносителя, обладающие более повышенной теплопроводностью по сравнению с лучшими металлическими проводниками теплоты [12, 13]. Принципы организации теплоотвода от электронных блоков с помощью тепловых труб и термосифонов изложены, например, в [14].

Конечной средой, поглощающей теплоту от приведенных выше теплоотводящих элемен-

тов и устройств в модулях, является, как правило, воздух, что и ограничивает их эффективность. При переходе к более эффективному поглощению теплоты жидкостью от съемных функциональных модулей возникает ряд конструкторско-технологических трудностей, связанных, в первую очередь, с организацией передачи теплоты от элементов съемного модуля к жидкостной магистрали и с обеспечением извлечения модуля из несущей конструкции без расчленения жидкостной магистрали. Разработки таких схем организации теплоотвода существуют, однако они крайне ограничены и имеют свои особенности с точки зрения применения в функциональных модулях ЭВМ.

Цель настоящей статьи – анализ известных конструктивно-технологических решений организации теплоотвода от съемных функциональных модулей ЭВМ к охлаждающей жидкости, построение обобщающих типичных схем, оценка их преимуществ и недостатков, поиск путей их совершенствования и разработка на этой основе перспективных схемных решений с повышенной эффективностью теплоотвода и надежностью работы.

Схемы известных конструктивно-технологических решений, их анализ и пути совершенствования

Для повышения эффективности охлаждения и снижения температуры элементов функциональных модулей в сложных ЭВМ модули размещают в несущих конструкциях (шкафах, стойках, стеллажах) с охлаждаемыми фреоном либо водой плитами, являющимися боковыми стенками несущей конструкции или ее полками. В известных решениях [4, 9, 15] теплота от электронных элементов передается с помощью металлических шин и соединенных с ними тепловых разъемов к охлаждающим плитам [16], что позволяет производить замену модулей без расчленения жидкостной магистрали. Схемное решение такой технологии отвода теплоты от элементов функционального модуля, расположенного вертикально между охлаждаемыми гори-

зонтальными полками несущей конструкции, приведено на рис. 1, а. Недостаток такого конструктивно-технологического решения – различная эффективность охлаждения элементов, размещенных на шине платы на различном удалении от периферийных охлаждаемых зон модуля, при этом элементы в центральной области платы находятся в более неблагоприятных температурных условиях.

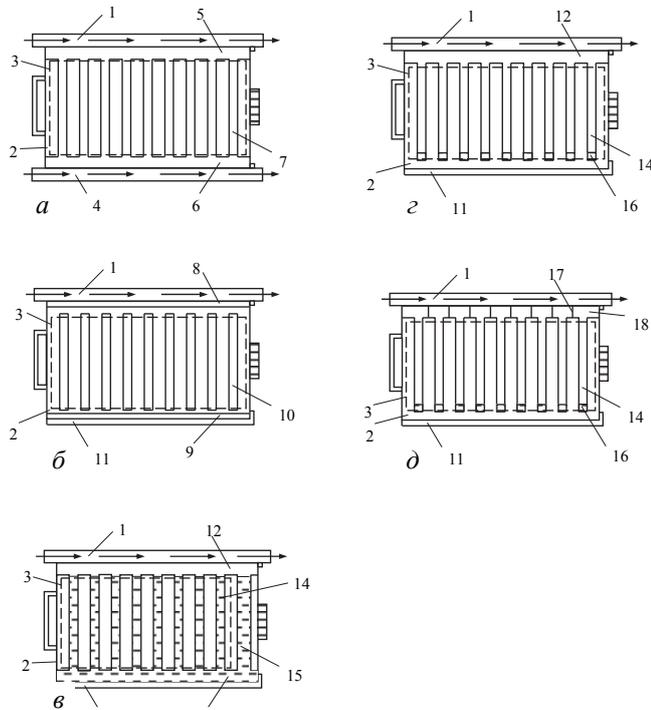


Рис. 1. Конструктивные схемы модулей. 1 – верхняя охлаждающая полка; 2 – печатная плата; 3 – границы области установки электронных элементов; 4 – нижняя охлаждающая полка; 5, 6 – верхняя и нижняя коллекторные металлические пластины; 7 – шина; 8, 9 – верхняя и нижняя теплоотводящие зоны металлической подложки платы; 10 – тепловая труба; 11 – опорное основание; 12 – собирающий коллектор; 13 – раздающий коллектор; 14 – испарительный канал; 15 – возвратный канал; 16 – избыток теплоносителя; 17 – герметичная перегородка; 18 – конденсационная зона секции коллекторной тепловой трубы

Наши попытки обеспечить выравнивание температуры элементов в модулях с такой схемой охлаждения привели к разработке модуля с металлическим теплоотводом, выполненным в виде параллельно расположенных шин, имеющих переменное по длине шины поперечное сечение [17]. Переменное сечение шин обеспечивает равномерную температуру

электронных элементов, установленных на плате, за счет различного термического сопротивления шины на отдельных ее участках, а водяное охлаждение обеспечивает эффективный отвод теплоты от верхнего и нижнего периферийных коллекторных участков теплоотвода. Недостаток такого конструктивно-технологического решения, ограничивающий его широкое применение – сложность технологической реализации, обусловленная необходимостью использовать перестраиваемые штампы для получения переменного сечения шин.

Другим схемным решением, позволяющим повысить равномерность температурного поля печатной платы и установленных на ней электронных элементов, является установка последних на отдельные плоские тепловые трубы или встраивание цилиндрических тепловых труб в печатные платы. В первом варианте [7] тепловые трубы располагаются рядами на плате. Периферийные участки тепловых труб находятся в тепловом контакте с охлаждаемыми фреоном плитами, служащими одновременно боковыми стенками базовой несущей конструкции. Достаточно высокая изотермичность по длине тепловой трубы и устанавливаемых на ней элементов, а также высокая эффективность отвода теплоты при кипении фреона в боковых стенках корпуса является бесспорным преимуществом такого конструктивно-технологического решения. К недостаткам можно отнести необходимость использования холодильной машины и сложность технологии изготовления тепловых труб. Однако, в условиях серийного производства последний недостаток становится менее значимым и стоимость изготовления тепловых труб может быть невысокой. Во втором варианте [18] тепловые трубы диаметром 1 мм расположены параллельно с определенным шагом. С двух сторон к их поверхности припресованы печатные платы. Отверстия в печатных платах под выводы элементов проходят между тепловыми трубами. Концы тепловых труб выступают за пределы печатных плат с двух сторон. Такая конструкция, также как и в

первом варианте, плохо приспособлена для контактирования с охлаждающими горизонтальными полками.

Для использования ряда отдельных тепловых труб простейшей формы в функциональных модулях, устанавливаемых вертикально в приборных шкафах с охлаждаемыми водой горизонтальными полками, можно рекомендовать усовершенствованную схему (рис. 1, б). С охлаждающей полкой контактируют периферийные участки металлической подложки платы, к которой прикреплены тепловые трубы. В этой схеме упрощается конструкция теплового разъема, однако поверхность зоны конденсации тепловых труб ограничена и появляется дополнительное термическое сопротивление периферийных участков металлической пластины, что уменьшает эффективность теплоотвода.

Развить поверхность зон конденсации тепловых труб и теплового разъема позволяет использование в функциональных модулях коллекторных термосифонов с рядом испарительных каналов, на внешней поверхности стенок которых устанавливаются охлаждаемые электронные элементы, и одним возвратным каналом [15]. Типичная схема организации такой технологии отвода теплоты применительно к функциональному модулю ЭВМ приведена на рис. 1, в. Теплоноситель полностью заполняет все испарительные каналы термосифона. По мере испарения теплоносителя из каналов его пополнение осуществляется из нижнего общего раздающего коллектора по принципу заполнения сообщающихся сосудов. Сконденсировавшийся в общем собирающем коллекторе теплоноситель по возвратному каналу поступает в раздающий коллектор.

Преимущество такой схемы – раздельное движение потоков пара и конденсата по различным каналам, что исключает их отрицательное взаимное влияние и способствует повышению эффективности теплоотвода.

К недостаткам коллекторных термосифонов следует отнести отсутствие капиллярно-пористого покрытия на внутренних стенках

каналов и полное затопление каналов теплоносителем, что снижает максимально допустимую плотность теплового потока, подводимого к испарительным каналам, а, соответственно, ограничивает максимальное количество теплоты, отводимое от электронных элементов. Широкому внедрению в практику конструирования таких теплоотводов препятствует недостаточная изученность процессов гидродинамики и теплообмена в коллекторных термосифонах с испарительными каналами малых размеров, наиболее предпочтительных с конструктивной точки зрения для использования в функциональных модулях вычислительной техники, а также отсутствие конкретных конструкторско-технологических разработок для реализации такой технологии в функциональных модулях.

Одним из возможных перспективных путей практической реализации технологии отвода теплоты по предложенной схеме можно рекомендовать выполнение испарительных и возвратных каналов, а также раздающего и собирающего коллекторов термосифона непосредственно в теле многослойной керамической печатной платы [19].

В настоящее время проводятся работы по изготовлению и исследованию макетов таких плат.

Предлагаемые новые схемы и их анализ

Устранить недостатки, свойственные схеме организации теплоотвода с помощью коллекторного термосифона, можно путем использования в конструкции функционального модуля коллекторной тепловой трубы с вертикально ориентированными испарительными каналами. Предлагаемая схема организации теплоотвода модуля на основе коллекторной тепловой трубы приведена на рис. 1, г. Функцию раздающего коллектора в такой схеме выполняет капиллярно-пористый слой (фитиль), нанесенный на внутреннюю поверхность испарительных каналов и внутреннюю нижнюю часть собирающего коллектора. Количество теплоносителя в испарительных каналах выбирается из условий полного заполнения ка-

пилляров фитиля и небольшого избытка теплоносителя внизу каждого канала для компенсации объема теплоносителя, испарившегося и находящегося в виде пленки жидкости на поверхности конденсации в процессе работы устройства.

Преимуществом теплоотвода на основе коллекторной тепловой трубы по сравнению со схемой с коллекторным термосифоном (рис. 1, в) является повышение максимально допустимых значений плотности теплового потока, подводимого к испарительным каналам и, в следствие этого, возможность применения более мощных электронных элементов в модуле. По сравнению с использованием ряда отдельных тепловых труб на плате (рис. 1, а) данная схема позволяет расширить площадь поверхности зоны конденсации и теплового разъема, а также максимально выравнять температуру поверхности всех испарительных каналов и устанавливаемых на них электронных элементов. Последнее преимущество достигается за счет объединения паровых полостей всех испарительных каналов в единую полость и выравнивания давления и температуры пара в них.

К недостаткам рассмотренной схемы можно отнести сложность технологии изготовления коллекторной тепловой трубы и возможность неравномерного перераспределения избытка теплоносителя по испарительным каналам в процессе длительной эксплуатации. Это может возникнуть, например, при переворачивании модуля, при значительно отличающихся тепловых мощностях, подводимых к различным испарительным каналам, при работе модуля в наклонном положении, в условиях механических воздействий и т.д.

С целью повышения надежности работы в условиях эксплуатации перспективным представляется использование в конструкции функционального модуля секционной коллекторной тепловой трубы. Схема организации отвода теплоты от модуля с помощью секционной коллекторной тепловой трубы показана на рис. 1, д. В отличие от предыдущей схемы

собирающий коллектор тепловой трубы разделен герметичными перегородками на отдельные секции по количеству испарительных каналов. Это дает возможность использовать, как и в предыдущей схеме, развитую поверхность зоны конденсации и теплового разъема и одновременно исключить неравномерное перераспределение теплоносителя между отдельными испарительными каналами. Однако в этом случае не удастся получить единую паровую полость коллекторной тепловой трубы. Поэтому выравнивание температуры пара в секциях осуществляется только через соседние герметичные перегородки, покрытые капиллярно-пористым слоем с обеих сторон и пропитанные теплоносителем, а также через общую поверхность охлаждающей плиты. Хотя добиться такого высокого выравнивания температуры пара в испарительных каналах, как в предыдущей схеме, во всех случаях здесь невозможно, в то же время при идентичности каналов и геометрических размеров секций можно получить достаточно высокую равномерность температур соответствующих электронных элементов всех каналов.

Экспериментальное исследование предложенной схемы с секционной коллекторной тепловой трубой

Для определения основных теплопередающих характеристик и предельных возможностей по отводу теплоты в функциональных модулях ЭВМ на основе секционной коллекторной тепловой трубы был изготовлен экспериментальный макет одной ее секции и проведены его экспериментальные исследования. Внешний вид изготовленного макета показан на рис. 2, а его основные характеристики приведены в таблице.

Материал секции – медь. На внутреннюю поверхность стенки испарительного канала и секции собирающего коллектора (кроме верхней стенки) был нанесен путем спекания металловолоконистый капиллярно-пористый слой (фитиль).

При экспериментальных исследованиях в качестве имитатора электронных элементов

использовался электрический нагреватель, а в качестве охлаждающей плиты – алюминиевая плита с внутренним каналом, по которому со скоростью 0,5 м/с прокачивалась охлаждающая вода с температурой на входе +30°C. Контактные поверхности тепловой трубы и охлаждающей плиты смазывались теплопроводной пастой КПТ-8. Тепловой поток от нагревателя подводился к внешней поверхности стенки испарительного канала по всему периметру на участке длиной 85 мм. Температурное поле секции коллекторной тепловой трубы измерялось с помощью десяти медь-константановых термопар: шесть термопар было установлено на стенке испарительного канала, три – на контактной поверхности секции собирающего коллектора и одна термопара была установлена в гильзе в паровом канале. Для предотвращения оттока теплоты с внешней поверхности макета с установленными на нем нагревателем и охлаждающей плитой она была покрыта теплоизолирующим слоем из базальтового войлока. По полученным значениям температур и тепловых потоков определялись основные рабочие характеристики секции тепловой трубы.

Характеристика	Значение
Длина испарительного канала	93 мм
Внешнее сечение испарительного канала	4 × 8 мм
Внутреннее сечение испарительного канала	3 × 7 мм
Толщина капиллярно-пористого слоя на стенках испарительного канала	0,5 мм
Пористость капиллярно-пористого слоя	84%
Длина секции собирающего коллектора	100 мм
Внешнее сечение секции коллектора	25 × 12 мм
Внутреннее сечение секции коллектора	23 × 10 мм
Теплоноситель	Вода
Количество теплоносителя	4 см ³

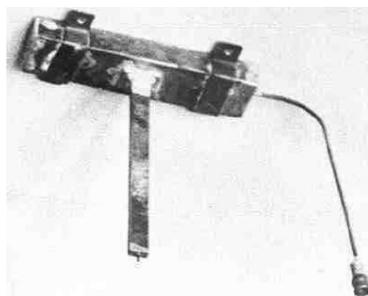


Рис. 2. Внешний вид макета секции коллекторной секционной тепловой трубы с заправочной трубкой

Результаты экспериментальных исследований

Одной из основных рабочих характеристик секции тепловой трубы является перепад температуры между зоной подвода теплоты (внешняя поверхность стенки испарительного канала) и зоной отвода теплоты (контактная поверхность секции тепловой трубы с охлаждающей плитой). Зависимость перепада средних значений температуры в зоне подвода теплоты и температуры в зоне отвода теплоты для исследованной секции тепловой трубы в диапазоне подводимых тепловых потоков (мощности имитатора электронных элементов) от 1,7 до 204 Вт показана на рис. 3, а. Из графика видно, что с увеличением тепловой нагрузки от 1,7 до 10,2 Вт перепад температуры увеличивается от 5,9 до 11,6°C, затем при дальнейшем росте теплового потока до 13,6 Вт наблюдается резкое уменьшение перепада температур вплоть до 4,1°C. Это объясняется изменением режима парообразования в испарительном канале: от режима испарения теплоносителя тепловая труба переходит в режим кипения теплоносителя, характеризующийся более высокой интенсивностью теплообмена. Для тепловых труб с металловолокнистой капиллярной структурой и водой в качестве теплоносителя переход от испарительного режима работы к режиму кипения наблюдается при плотностях подводимого теплового потока 0,5–1,0 Вт/см² [20], что и имело место в нашем исследовании (0,8 Вт/см²). Дальнейшее повышение подводимого теплового потока сопровождалось постоянным ростом перепада температур по секции тепловой трубы вплоть до 35,1°C при мощности нагревателя 204 Вт.

Другой важной рабочей характеристикой секции коллекторной тепловой трубы является максимальная температура на внешней поверхности стенки испарительного канала, куда устанавливаются охлаждаемые электронные элементы. На рис. 3, б приведена зависимость значения максимальной температуры на внешней стенке испарительного канала от

подводимого теплового потока. Точка, в которой фиксировалось максимальное значение температуры, находилась на расстоянии 3 мм от нижнего края испарительного канала. Как видно из рис. 3, б, вид кривой, характеризующий изменение максимальной температуры в зоне нагрева, аналогичен виду кривой перепада температур по секции тепловой трубы. Температура на поверхности стенки испарительного канала в контролируемой точке изменяется от 36,9°С при мощности теплоподвода 1,7 Вт до своего максимального значения 104,7°С при мощности теплоподвода 204 Вт.

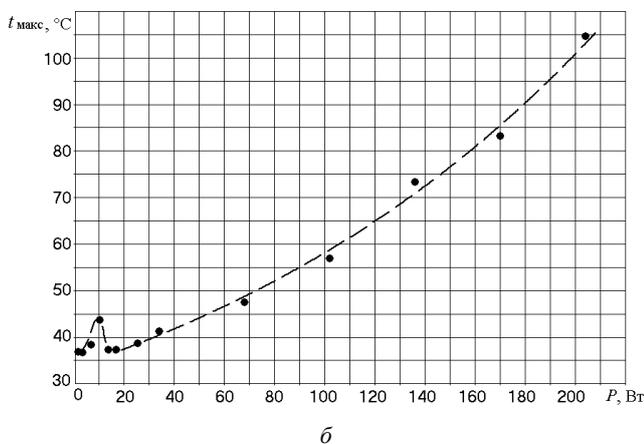
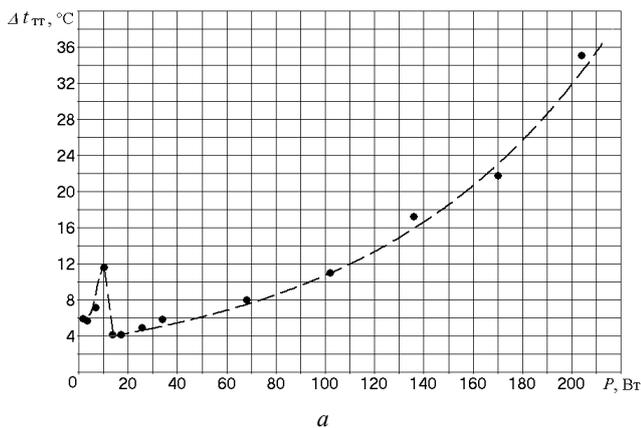


Рис. 3. Влияние передаваемого теплового потока P : а – на перепад температур $\Delta t_{тр}$ по секции тепловой трубы; б – на максимальную температуру $t_{макс}$ стенки испарительного канала

Практическая ценность полученных зависимостей

По графику, приведенному на рис. 3, б, задавая допустимую температуру на поверхности стенки испарительного канала, можно оп-

ределить максимально допустимую мощность тепловыделения охлаждаемых электронных элементов, устанавливаемых на одну секцию, а зная количество секций в секционной коллекторной тепловой трубе, возможно определить допустимую мощность электронных элементов, размещаемых в функциональном модуле ЭВМ. Можно решить и другую задачу: зная суммарную мощность электронных элементов, которые необходимо скомпоновать в пределах одной секции модуля, можно определить максимальную температуру внешней стенки испарительного канала, которая в этом случае будет иметь место, и определить целесообразность размещения всех элементов в пределах секции. При этом необходимо руководствоваться допустимым значением температуры корпуса элементов и учитывать перепад температуры в зоне контакта элемента с поверхностью стенки испарительного канала.

Знание общего перепада температуры по секции тепловой трубы (рис. 3, а) необходимо для определения температуры на поверхности стенки испарительного канала при других значениях температуры охлаждающей воды на входе в охлаждающую плиту либо при другой скорости воды в канале и заданных значениях суммарной мощности электронных элементов, размещаемых в пределах одной секции. Необходимое для этого значение температуры на теплоотводящей поверхности секции находят расчетным путем по известным в теории теплопередачи зависимостям для конвективного и контактного теплообмена.

Рассмотрим пример использования полученных зависимостей. По графику, приведенному на рис. 3, б, находим, что при использовании в конструкции функционального модуля ЭВМ секционной коллекторной тепловой трубы с одной секцией с характеристиками, приведенными в таблице, при максимально допустимой температуре на поверхности стенки испарительного канала 57°С допустимая мощность электронных элементов составляет 102 Вт. Тогда при использовании тепловой трубы с двумя такими секциями макси-

мальная мощность охлаждаемых элементов составит 204 Вт, а с тремя секциями – 306 Вт.

Предложенное конструктивно-технологическое решение функционального модуля с секционной коллекторной тепловой трубой отличается повышенной надежностью в условиях воздействия наклонов, качки, вибраций и других механических воздействий, а также после кратковременного переворачивания модуля, что объясняется обособленностью процессов в каждой секции тепловой трубы и исключением возможности перераспределения теплоносителя между секциями.

Заключение

1. Проанализированы известные конструктивно-технологические решения организации теплоотвода от съемных функциональных модулей ЭВМ, построены обобщающие типичные схемы отвода теплоты от элементов модуля к поглощающей жидкости. На основе оценки их преимуществ и недостатков предложены пути их совершенствования и новые схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей средств вычислительной техники и управления, основанные на использовании двухфазных технологий.

2. Наиболее предпочтительной с точки зрения эффективности теплоотвода и обеспечения эксплуатационной надежности является предложенная новая схема с использованием в конструкции модуля секционной коллекторной тепловой трубы.

3. Полученные в результате экспериментального исследования зависимости перепада температур по секции коллекторной тепловой трубы и максимальной температуры стенки испарительного канала от подводимого теплового потока могут быть использованы в практике конструирования функциональных модулей ЭВМ. В частности, они показывают, что допустимая мощность электронных элементов, устанавливаемых в модуле с одной секцией, при температуре стенки испарительного канала 57°C составляет 102 Вт, с двумя секциями, соответственно, – 204 Вт и с тремя секциями – 306 Вт.

4. Дальнейшие исследования необходимо сосредоточить на изучении относительного влияния отдельных составляющих на перепад температур по секции тепловой трубы и на общий перепад температур «стенка испарительного канала – охлаждающая вода», что позволит определить пути дальнейшего уменьшения общего перепада температур.

1. Аспекты разработки и создания кластерных вычислительных систем / О.С. Аладышев, О.И. Вдовинкин, А.П. Овсянников и др. // Известия вузов. Электроника. – 2004. – № 1. – С. 36–42.
2. Левин В.К. Создание и применение суперкомпьютеров в России (современность и ближайшая перспектива) // Радиозлектроника и управление. – 2003. – № 7–9. – С. 61–62.
3. Белоусов Ю.А. Отказоустойчивые бортовые вычислительные системы. Вопросы построения аппаратной части // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 18–23.
4. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем. – М.: Высш. школа, 1989. – 312 с.
5. Верхопятницкий П.Д., Латинский В.С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1983. – 232 с.
6. Борисов Ю.И. О реализуемости трактов приема и обработки пассивных систем подводного акустического наблюдения на основе специализированных микропроцессоров отечественного производства // Судостроение. – 2003. – № 5. – С. 46–48.
7. Валентинова М. 64-бит процессоры дают плотно упакованные решения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес. – 2004. – № 3. – С. 30–37.
8. Печатные платы на основе теплопроводных электроизоляционных материалов компании Bergquist // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука. Технология. Бизнес. – 2002. – № 2. – С. 46–47.
9. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. – М.: Высш. школа, 1990. – 432 с.
10. Макаров С. Процессорные куллеры: летнее изобилие // Компьютерное обозрение. – 2001. – № 29. – С. 17–22.
11. Булат Л.П. Новое поколение твердотельных охладителей // Холодильная техника. – 2004. – № 8. – С. 2–7.
12. Алексеев В.А., Арефьев В.А. Тепловые трубы для охлаждения и термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
13. Семенин М.Г., Герцуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. – К.: Вища школа, 1984. – 215 с.
14. Ткаченко В.Б., Смирнов Г.Ф. Принципы организации теплоотвода на основе кондуктивно-испарительных систем.

- тельных устройств в передвижных обслуживаемых комплексах РЭА // Холодильна техніка і технологія. – 2001. – № 3. – С. 6–11.
15. *Резников Г.В.* Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
16. *Барабаш М.Б., Кайданов А.И., Янковский В.Н.* Анализ конструкторско-технологических и тепловых характеристик разъемных тепловых соединителей для систем охлаждения перспективной РЭА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1979. – Вып. 1. – С. 95–112.
17. *А.с. № 871355 СССР, МКИ Н 05 К 7/20.* Радиоэлектронный блок / В.В. Гайдамаченко, Э.П. Иванов, Ю.Е. Николаенко. – 4 с. ил.; Оpubл. 07.10.81, Бюл. № 37.
18. *Заявка на патент Японии № 1-286395, МПК Н05К7/20.* Монтажная плата / Синбаси Суэо, Окаваути Мицуо, Хатиаки Акихиро: Фудзицу к.к. – № 63-113672; заявл.12.05.88; опубл. 17.11.89 // Кокай токке кохо. Сер. 7(2).– 1989. – 262. – С. 489–493. – Яп.
19. *Деклараційний патент України на винахід № 45075 А, МПК Н 05К 7/20.* Мікроборка електронного блока / Ю.Є. Ніколаєнко. – 5 с. ил.; Оpubл. 15.03.2002, Бюл. № 3.
20. *Гершуни А.Н.* Исследование основных характеристик процессов тепломассообмена в низкотемпературных тепловых трубах с металловолоконистыми фитилями. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: ИТТФ АН УССР. – 1977. – 24 с.

Поступила 29.11.2004
Тел. для справок: (044) 246-3238 (Киев)
E-mail: nikol@industry.gov.ua
© Ю.Е. Николаенко, 2005