



УДК 004.3'124

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.140.146

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОТВОДА МОДУЛЕЙ 6U В МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

PROVIDING HEAT DISSIPATION FOR 6U MODULES IN BACKBONE-MODULAR SYSTEMS BASED ON HIGH-SPEED INTERFACES FOR SPACE APPLICATIONS

ЗУЙКОВ АРТЕМИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ
doczuikov@gmail.com

ZUIKOV ARTEMII V.
doczuikov@gmail.com

ВОРОБЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

VOROBIEV ALEXANDER A.

СЕРЯКОВ СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

SERIAKOV SERGEI E.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1

SRISA RAS
bld. 1, 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, 117218

В данной статье рассматриваются подходы к обеспечению теплопередачи модуля 6U в корпусе магистрально-модульной системы типа SpaceVPX с кондуктивным охлаждением. Рассмотрена типовая конструкция модуля 6U, вычислена максимальная потребляемая мощность модуля для данной системы охлаждения. Рассчитаны значения тепловых сопротивлений улучшенной кондуктивной системы охлаждения модуля 6U.

Ключевые слова: тепловое сопротивление; перенос тепла; системы SpaceVPX; модуль 6U; кондуктивное охлаждение; радиатор; клиновой механизм; печатная плата.

This article examines the approaches to ensuring the heat transfer of the 6U module in the case of a space-modular system of the SpaceVPX type with conductive cooling. The typical design of the 6U module has been considered, the maximum consumed modularity of the module for this cooling system has been calculated. The values of the thermal resistances of the improved conductive cooling system of the 6U module have been calculated.

Keywords: thermal resistance; heat transfer; SpaceVPX systems; 6U module; conductive cooling; heat sink; wedge mechanism; printed circuit board (PCB).

ВВЕДЕНИЕ

Стандартизованный подход к построению систем для ответственных приложений проник и в аэрокосмическую отрасль. Стандарт SpaceVPX [1] является логичным развитием стандарта VPX, который является преемником зарекомендовавшей себя архитектуры VME, которая при этом не отвечает современным требованиям по производительности. Актуальность разработки систем на базе стандарта SpaceVPX обусловлена усложнением решаемых задач, а именно требованиями к сокращению сроков разработки и повышению надежности, возможности модернизации систем и повышению их быстродействия.

Ключевым элементом архитектурного определения стандарта SpaceVPX является профиль объединительной платы, который определяет топологию межсоединений слотов для каждого используемого типа слота подобно стандарту OpenVPX [2]. Стандарт SpaceVPX по сравнению с OpenVPX призван обеспечить требуемый для аэрокосмической отрасли уровень отказоустойчивости, в том числе за счет дублирования узлов и интерфейсов. Стандарт допускает применение модулей в форм-факторе 3U и 6U. В данной статье рассматриваются вопросы обеспечения теплоотвода модулей 6U в защищенных системах с кондуктивным охлаждением, в которых вопросы отвода тепла встают наиболее остро (VITA 48.2) [3]. В соответствии со стандартом максимальное энергопотребление модулей 6U ограничено на уровне 100 Вт — под данную мощность рассчитаны разъемы. Для успешной реализации системы

рекомендуется не превышать уровень максимального энергопотребления модуля в 50 Вт.

В данной работе рассматривается типовая система охлаждения и оценивается возможность ее использования с современными процессорными модулями. Приведены подходы и выполнены расчеты, направленные на повышение эффективности системы с кондуктивным охлаждением. Оценена актуальность использования улучшенной системы с кондуктивным охлаждением путем расчета максимальной рассеиваемой мощности в ответственных применениях аэрокосмической отрасли.

МЕТОДОЛОГИЯ

VPX-система, представленная на рис. 1, состоит из трех процессорных модулей 6U и одного модуля питания. Процессорный модуль имеет потребление 56 Вт, основным энергопотребителем являются два процессорных узла, расположенных симметрично относительно центра модуля.

С основных энергопотребителей, расположенных на печатной плате (ПП) процессорного модуля, выделяемое тепло снимается при помощи радиатора, установленного на плату. Для обеспечения теплоотвода с радиатора модуля на корпус изделия применяется клиновой механизм (см. рис. 1), который также предназначен для фиксации модуля в корпусе ЭВМ. При расширении клиновой механизм надежно фиксирует модуль в корпусе ЭВМ и обеспечивает теплопередачу.

В типовой конструкции процессорного модуля радиатор и клиновой механизм выполняются из материала Д16Т, покрытие выполнено с помощью анодного оксидирования, сечение ПП и трассировка не оптимизируются для выполнения задач теплоотвода. В среде САПР SolidWorks для типовой конструкции системы охлаждения выполнен расчет максимальной потребляемой мощности модуля 6U, которая составляет 48 Вт. Расчет проводился без учета теплопередачи в окружающую среду с фиксированной температурой стенок корпуса, составляющей $+60^{\circ}\text{C}$, максимально допустимая температура микропроцессора составляет $+125^{\circ}\text{C}$, но для обеспечения надежности при выполнении расчетов ограничена значением $+115^{\circ}\text{C}$. Расчетная модель с основными исследуемыми элементами представлена на рис. 2.

В ходе исследования эффективности работы радиатора в части обеспечения теплоотвода были обнаружены следующие его недостатки и возможности для повышения эффективности системы охлаждения:

- малая теплопроводность материала и покрытия радиатора и клинового механизма;
- недостаточное прижатие радиатора к крышке корпуса микропроцессора;
- недостаточное усилие прижатия, развиваемое клиновым механизмом;
- малая теплопроводность ПП.

По данным расчетов, для исходной конструкции вычислительного модуля при предельных условиях эксплуатации температура кристалла процессора достигает 115°C , что является критической температурой работы микропроцессора. Для обеспечения работоспособности модуля принято решение об анализе



Рис. 1. VPX-система с кондуктивным охлаждением, процессорный модуль (два процессорных узла) с радиатором

Fig. 1. VPX-system with conductive cooling, processor module (two processor nodes) with a heat sink

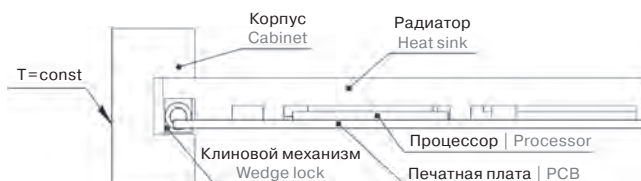


Рис. 2. Расчетная модель вычислительного модуля

Fig. 2. Main cooling system parts of the computing module

всех составляющих системы охлаждения отдельно, учитывая вклад каждого элемента в уменьшение температуры процессора. В ходе расчетов было оценено процентное уменьшение температуры процессора при изменении конструкции и материалов радиатора, клинового механизма модуля и ПП.

ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА

Рассматривая систему охлаждения процессорных модулей, выполненных по стандарту SpaceVPX, следует учитывать все возможные способы охлаждения, включая отвод тепла

INTRODUCTION

A standardized approach to building systems for mission-critical applications has become widely used in the aerospace industry. The SpaceVPX [1] standard is an improvement of the VPX standard, which is a successor to the proven VME architecture, but does not meet modern performance requirements. The relevance of the development of systems based on the SpaceVPX standard is due to the increasing complexity of the tasks to be solved, namely, requirements to reduce development time and improve reliability, the ability to upgrade systems and improve their performance.

A key element of the architectural definition of the SpaceVPX standard is the backplane profile, which defines the slot wiring topology for each slot type used, similar to the OpenVPX standard [2]. The SpaceVPX standard compared to OpenVPX is designed to provide the required level of fault tolerance

for the aerospace industry, also by duplicating nodes and interfaces. The standard allows the use of modules in the form factor 3U and 6U. This article deals with the issues of ensuring the heat removal from 6U modules in protected systems with conductive cooling, in which the issues of heat removal are most acute (VITA 48.2) [3]. In accordance with the standard, the maximum power consumption of the 6U modules is limited to 100 W — the connectors are calculated for this power. For successful implementation of the system, it is recommended not to exceed the maximum power consumption level of the module of 50 watts.

A typical cooling system and its usage possibilities with modern processor modules are being considered in this article. Approaches and calculations aimed at improving the efficiency of the system with conductive cooling have been defined. The relevance of the use of an improved system with conductive

cooling has been evaluated by calculating the maximum power dissipation, in critical aerospace applications.

METHODOLOGY

The VPX system presented in Fig. 1 consists of three 6U processor modules and one power module. The processor module has a power consumption of 56 W, the main power consumer being two processor nodes located symmetrically relative to the center of the module.

From the main energy consumers located on the printed circuit board (PCB) of the processor module, the heat released is removed using a heat sink installed on the PCB. To provide heat removal from the heat sink to the body of the computer, a wedge lock is used (see Fig. 1), which is also intended to fix the module in the computer case. When expanding, the wedge lock reliably fixes the module in the computer case and provides heat transfer.



непосредственно через ПП. На данном этапе проведено исследование различных способов повышения планарного и нормального коэффициентов теплопроводности ПП, сопоставлено увеличение коэффициента теплопроводности с увеличением массы ПП. На примере типового модуля в предельном режиме эксплуатации проведено моделирование. Результаты моделирования дают наглядное представление об эффективности предложенных способов.

Начальные характеристики исследуемого модуля:

- коэффициент теплопроводности проводника — 394 Вт/м·К;
- коэффициент теплопроводности диэлектрика — 0,3 Вт/м·К;
- процент заполнения медью опорных слоев — 97,5%;
- процент заполнения медью сигнальных слоев — 30%;
- толщина меди — 0,5 оз.

Печатная плата как составное изделие обладает анизотропной теплопроводностью, зависящей от структуры платы, вычисление которой можно произвести с учетом осредненного заполнения проводящих слоев медью. Эффективный коэффициент теплопроводности через плоскость печатной платы (нормальный) рассчитывался по формулам (1)–(2). Для расчета эффективного коэффициента теплопроводности в плоскости ПП (планарный) использовались формулы (3), (4). Помимо теплопроводности важным фактором является масса платы, повышение которой крайне нежелательно. Массу платы можно оценить с помощью эффективной плотности печатной платы по формулам (5).

$$\frac{1}{K_{thro}} = \frac{A/100}{K_C} - \frac{1-(A/100)}{K_D}, \quad (1)$$

где K_{thro} — нормальный коэффициент теплопроводности слоя; K_C — коэффициент теплопроводности меди; K_D — коэффициент теплопроводности диэлектрика; A — процент заполнения слоя медью.

$$K_{th} = \frac{t}{\sum \frac{t_{Ci}}{K_{throCi}} + \sum \frac{t_{Di}}{K_{throDi}}}, \quad (2)$$

где K_{th} — нормальный коэффициент теплопроводности ПП; t — общая толщина ПП; K_{thDi} — нормальный коэффициент теплопроводности слоя диэлектрика; K_{thCi} — нормальный коэффициент теплопроводности проводящего слоя; t_{Ci} — толщина слоя диэлектрика; t_{Di} — толщина проводящего слоя.

$$K_{in} = K_C \frac{A}{100} + K_D \left(1 - \frac{A}{100}\right), \quad (3)$$

где K_{in} — планарный коэффициент теплопроводности слоя; K_C — коэффициент теплопроводности меди; K_D — коэффициент теплопроводности диэлектрика; A — процент заполнения слоя медью.

$$K_i = \frac{\sum t_{Di} K_{inDi} + \sum t_{Ci} K_{inCi}}{t}, \quad (4)$$

где K_i — планарный коэффициент теплопроводности ПП; t — общая толщина ПП; K_{inDi} — планарный коэффициент теплопроводности слоя диэлектрика; K_{inCi} — планарный коэффициент теплопроводности проводящего слоя; t_{Ci} — толщина слоя диэлектрика; t_{Di} — толщина проводящего слоя.

$$m = \rho V; \quad \rho = \frac{\rho_C V_C + \rho_D V_D}{V} \quad (5)$$

$$V_C = V \frac{A}{100}; \quad V_D = V \left(1 - \frac{A}{100}\right),$$

где m — масса печатной платы; ρ — эффективная плотность ПП; ρ_C и ρ_D — соответственно плотности материалов проводника и диэлектрика; V — общий объем ПП; V_C и V_D — соответственно объемы проводника и диэлектрика в ПП.

Увеличение теплопроводности ПП положительно сказывается на теплоотводе от наиболее мощных элементов модуля, таких как микропроцессор и преобразователи питания. Повышение теплопроводности ПП позволяет уменьшить максимальную температуру в зоне установки элементов, тем самым уменьшая вероятность их отказа из-за перегрева.

In the typical design of the processor module, the heat sink and wedge lock are made of aluminum D16T (analogue aluminum 2024-T3), the coating is made using anodic oxidation, the cross section of the PCB and tracing are not optimized for the tasks of improving heat transfer. By using the Solidworks CAD for a typical design of the cooling system, the volume of 6U module is defined as 48 watts. The analysis was carried out without taking into account the heat transfer to the environment with a fixed temperature of the cabinet walls, which is +60 °C, the maximum permissible microprocessor temperature is +125 °C, but to ensure reliability when performing analysis, it is limited to +115 °C. The analysis model with the main elements under study is presented in Fig. 2.

The analysis of the heat sink efficiency in terms of ensuring heat removal has revealed the following shortcomings and possibilities

for increasing the efficiency of the cooling system:

- Low thermal conductivity of the material and coating covering the heat sink and wedge lock;
- Low pressure of the heat sink on the microprocessor case cover;
- Low pressing force developed by the wedge lock;
- Low thermal conductivity of PCB.

According to the analysis of the initial design of the computational module under extreme conditions of operation, the temperature of the processor chip reaches 115 °C, which is the critical temperature of the microprocessor. To ensure the efficiency of the module, it was decided to analyze all components of the cooling system separately, and upon having analyzed the contribution of each element to the decrease in the processor temperature. In the course of the analysis, the percentage decrease in the temperature

of the processor when changing the design and materials of the heat sink, the wedge lock of the module and the PCB was estimated.

PRINTED CIRCUIT BOARD

If you consider the cooling system of the processor modules made according to the SpaceVPX standard, you should take into account all possible cooling methods, including heat removal directly through the PCB. At this stage, a research was conducted of various ways to increase the planar and normal thermal conductivity coefficients of PCB, and increase in the thermal conductivity coefficient was compared with increase of the board mass. Simulation was performed based on the example of a typical module in the limit conditions. The simulation data provide a visual representation of the effectiveness of the proposed methods.

Initial characteristics of the explored module are as follows:



Рассматривая отвод тепла с процессора через печатную плату, следует обратить внимание на использующийся изоляционный материал. В качестве образцов для исследования используется линейка изоляционных материалов MCL-E производителя Hitachi [4]. Данные материалы имеют подходящие электрические характеристики для разработки сечения печатной платы, физические характеристики для использования в тяжелых условиях окружающей среды, при этом коэффициент теплопроводности материала меняется от 0,3 до 0,9 Вт/м·К. Некоторые современные материалы имеют коэффициент теплопроводности до нескольких единиц Вт/м·К, однако для сложных печатных плат со сквозными отверстиями, использующихся в аэрокосмической отрасли, такие изоляторы не подходят ввиду их механических характеристик. В связи со строением печатной платы основное влияние на планарный коэффициент теплопроводности оказывается слоями меди. Однако слой диэлектрика, как правило, значительно толще слоев меди, и материал диэлектрика оказывает значительное влияние на нормальный коэффициент теплопроводности.

При использовании типоразмера платы, определенного стандартом SpaceVPX, возможны случаи, что для корректной разводки печатной платы нет необходимости в использовании всей области каждого сигнального слоя. В таких случаях для повышения параметров теплопроводности рекомендуется заполнять полигонами земли пустоты, образовавшиеся в сигнальных слоях. Процент заполнения сигнальных слоев медью значительно отражается на планарном коэффициенте теплопроводности платы. Для определения оптимальной конфигурации печатной платы с точки зрения охлаждения процессора был проведен ряд расчетов, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Варианты расчетов для печатной платы

Table 1. PCB calculation parameters

№ варианта Version №	Среднее заполнение медью слоев ПП, % Average copper fill of PCB layers, %	Коэффициент теплопроводности диэлектрика, Вт/мК The dielectric thermal conductivity coefficient, W/mK	Толщина проводящего слоя, oz Conductor layer thickness, oz
1	46,6	0,3	0,5
2	46,6	0,8	0,5
3	76,25	0,8	0,5
4	76,25	0,8	1
5	76,25	0,8	2
6	76,25	0,8	3

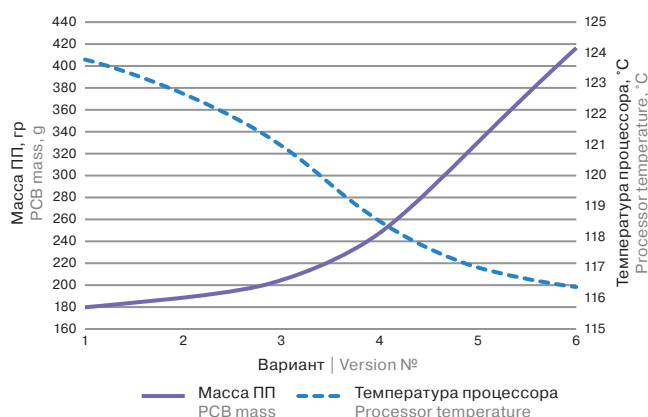


Рис. 3. Соотношение массы печатной платы и температуры процессора

Fig. 3. The ratio of the PCB mass of the printed circuit board to the temperature of the processor

- Thermal conductivity coefficient of conductor: 394 W/m·K;
- Thermal conductivity coefficient of dielectric: 0.3 W/m·K;
- The percentage of copper filling power layers: 97.5%;
- The percentage of copper filled routing layers: 30 %;
- Copper thickness: 0.5 oz.

A printed circuit board, as a composite product, possesses anisotropic thermal conductivity, depending on the structure of the board, which can be calculated taking into account the averaged filling of the conductive layers with copper. It was calculated by the formulas (1)–(2). Formulas (3), (4) were used to calculate the effective thermal conductivity in the plane of the printed circuit board (planar). In addition to thermal conductivity, an important factor is the mass of the board, whose increase is highly undesirable. The mass of the board can be estimated using

the effective density of the printed circuit board by formulas (5).

$$\frac{1}{K_{thro}} = \frac{A/100}{K_C} + \frac{1-(A/100)}{K_D}, \quad (1)$$

where K_{thro} is normal thermal conductivity of the layer; K_C — the coefficient of thermal conductivity of copper; K_D — the dielectric thermal conductivity coefficient; A — the percentage of the layer filled with copper.

$$K_m = \frac{t}{\sum \frac{t_{Ci}}{K_{throCi}} + \sum \frac{t_{Di}}{K_{throDi}}}, \quad (2)$$

where K_{thro} is normal thermal conductivity of the PCB; t — total thickness of the PCB; K_{throDi} — normal thermal conductivity of the dielectric layer; K_{throCi} — normal thermal conductivity of the routing layer; t_{Di} — dielectric layer thickness; t_{Ci} — routing layer thickness.

$$K_m = K_C \frac{A}{100} + K_D \left(1 - \frac{A}{100}\right), \quad (3)$$

where K_m is planar coefficient of thermal conductivity of the layer; K_C — copper thermal conductivity coefficient; K_D — dielectric thermal conductivity coefficient; A — the percentage of the layer filled with copper.

$$K_i = \frac{\sum t_{Di} K_{mDi} + \sum t_{Ci} K_{mCi}}{t}, \quad (4)$$

where K_i is planar coefficient of thermal conductivity of the PCB; t — total thickness of the PCB; K_{mDi} — planar coefficient of thermal conductivity of the dielectric layer; K_{mCi} — the planar coefficient of thermal conductivity of the routing layer; t_{Di} — dielectric layer thickness; t_{Ci} — routing layer thickness.

$$m = \rho V; \quad \rho = \frac{\rho_C V_C + \rho_D V_D}{V} \quad (5)$$

$$V_C = V \frac{A}{100}; \quad V_D = V \left(1 - \frac{A}{100}\right);$$

where m is PCB mass, ρ — effective PCB density; ρ_C and ρ_D — respectively, the density

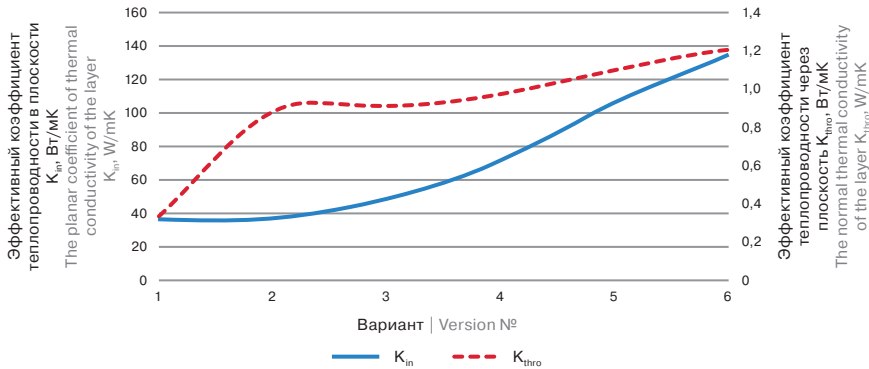


Рис. 4. Соотношение теплопроводностей печатной платы
Fig. 4. The ratio of thermal conductivity of the PCB

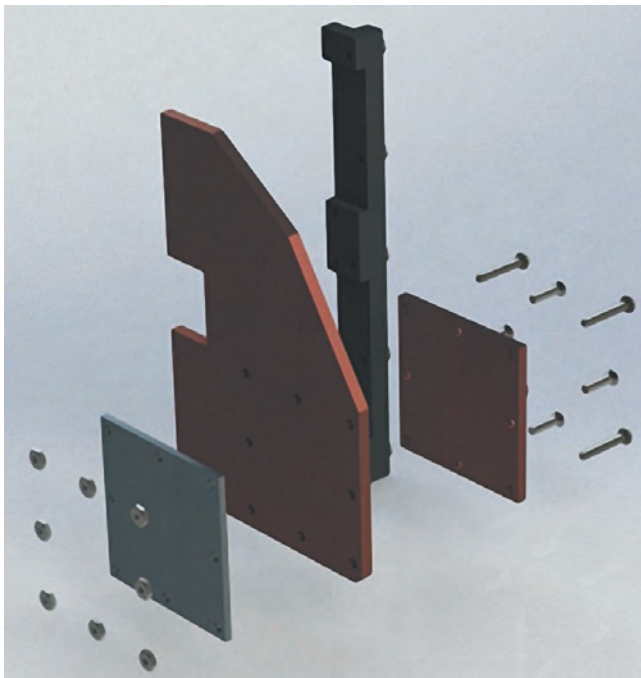


Рис. 5. Конструкция гибкого радиатора
Fig. 5. The design of a flexible-rigid heat sink

of the conductor material and the density of the dielectric material; V — total volume of PCB; V_c and V_d — respectively, volume of conductor in the PCB and volume of dielectric in the PCB.

Increasing the thermal conductivity of the PCB has a positive effect on the cooling from the most powerful elements of the module, such as, say, a microprocessor and power converters. Increasing the thermal conductivity of the PCB allows reducing the maximum temperature in the zone of installation of elements, thereby reducing the probability of their failure due to overheating.

If you are considering the removal of power from the processor through the printed circuit board, you should pay

attention to the insulation material. A product range of insulation materials MCL-E, manufacturer Hitachi [4], was used as samples for the research. The mentioned materials have suitable electrical characteristics for the development of a printed circuit board section, physical characteristics for use in harsh environmental conditions, and the coefficient of thermal conductivity of the material varies from 0.3 to 0.9 W/m·K. Some modern materials have the coefficient of thermal conductivity up to several units of W/m·K, however, for compound printed circuit boards with through holes used in the aerospace industry, such insulators are not suitable due to their mechanical characteristics. Layers of copper have a significant

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 3, 4.

Проанализировав полученные графики, можно заключить, что большего увеличения теплопроводности печатной платы можно добиться за счет увеличения толщины используемой меди. Однако ее изменение также вызовет значительное увеличение массы платы. Толщина меди в большей степени отражается на планарном коэффициенте теплопроводности. Наибольшую эффективность имеет увеличение толщины меди до 1 оз, последующее увеличение толщины меди менее эффективно.

КЛИНОВОЙ МЕХАНИЗМ

Задачей клинового механизма, помимо фиксации вычислительного модуля в корпусе ЭВМ, является обеспечения надежного контакта радиатора вычислительного модуля с корпусом ЭВМ для обеспечения наилучшей теплопередачи в зоне контакта. Исследование влияния параметров клинового механизма было проведено в работе [5], расчетные данные из которой были использованы в данной работе.

Наилучшим с точки зрения охлаждения модуля является вариант клинового механизма из алюминия АД31Т1 с покрытием, выполненным химическим оксидированием, и стягивающим винтом с повышенным классом прочности, позволяющим произвести затяжку с моментом 5,6 Н/м. При расчете с исходной конфигурацией ПП-модуля и улучшенным клиновым механизмом уменьшение температуры процессора составило 1,5%, или 1,9°C.

РАДИАТОР

Основной проблемой монолитного радиатора, как указывалось ранее, является недостаточное прижатие к крышке процессора, а также возможная непараллельность соприкасающихся плоскостей теплопередачи крышки процессора и радиатора. Это связано с технологическими допусками на пайку BGA-микросхем, при которой для микросхемы с размерностью 31×31 выводов отклонение плоскостности может достигать

influence on the planar coefficient of thermal conductivity due to the structure of the PCB. However, dielectric layers are usually much thicker than copper layers, and the dielectric material has a significant influence on the normal thermal conductivity coefficient.

Using the standard size of the board, defined by the SpaceVPX standard, we can do without using the entire area of each routing layer for correct layout of the printed circuit board. In such cases, to increase the thermal conductivity parameters, it is recommended to fill voids in the signal layers by the ground shapes. The percentage of filling the routing layers with copper significantly affects the planar thermal conductivity coefficient

0,2 мм [6]. Для улучшения теплоотдачи с крышки процессора была разработана конструкция гибко-жесткого радиатора, конструкция которого представлена на рис. 5. Особенностью этого радиатора является то, что основное теплопроводящее тело выполнено не монолитным, а собирающимся из медных листов.

Основным преимуществом данного радиатора является подвижность со стороны тепловоспринимающей поверхности, а также технологичность изготовления. К недостаткам же можно отнести большую по сравнению с исходным радиатором массу. Для достижения оптимального соотношения масса/температура процессора была произведена серия расчетов с различным количеством медных листов для радиатора, результаты которых представлены на рис. 6.

Для определения минимальной температуры процессора, обеспечиваемой совокупностью всех возможных решений, был произведен расчет для модуля со следующими характеристиками: жестко-гибкий радиатор с 12 медными листами, ПП с заполнением медью 76% и толщиной проводящих слоев 1 oz, а также клиновой механизм из материала АД31Т1 с покрытием, выполненным химическим никелированием. Результатом этих доработок стало достижение температуры процессора 102,2°C и массы модуля 784 грамма, при том что масса исходного модуля достигает 480 грамм. Разработанная конфигурация модуля позволила повысить максимальную рассеиваемую мощность модуля до 73 Вт. Результаты сравнения исходного и доработанного модулей представлены на рис. 7.

ВЫВОД

По результатам расчетов видно, что максимальная рассеиваемая мощность типовой конструкции системы с кондуктивным охлаждением составляет 48 Вт, что, в свою очередь, является недостаточным для ее использования в современных магистрально-модульных системах, где максимальное энергопотребление модулей 6U составляет 50 Вт и выше.

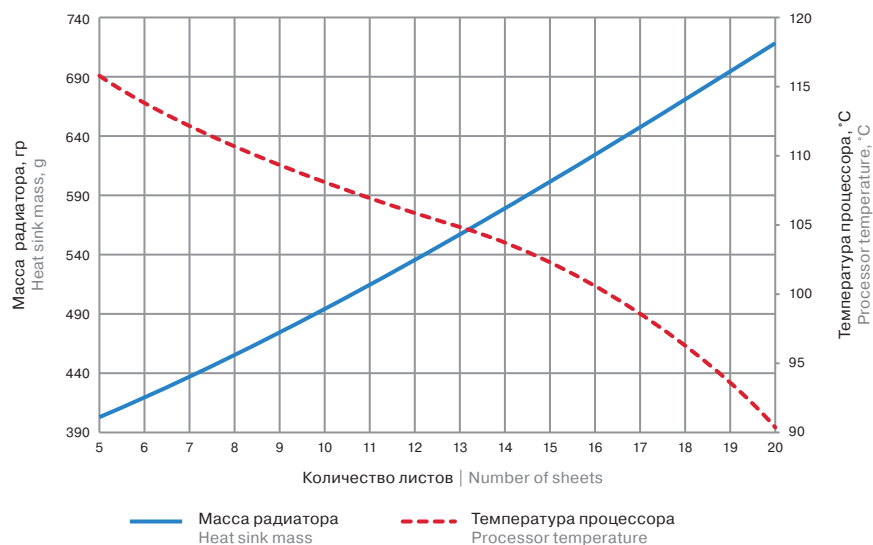


Рис. 6. Зависимость массы радиатора и температуры процессора от количества листов
Fig. 6. Dependence of the heat sink mass and the temperature of the processor on the number of sheets

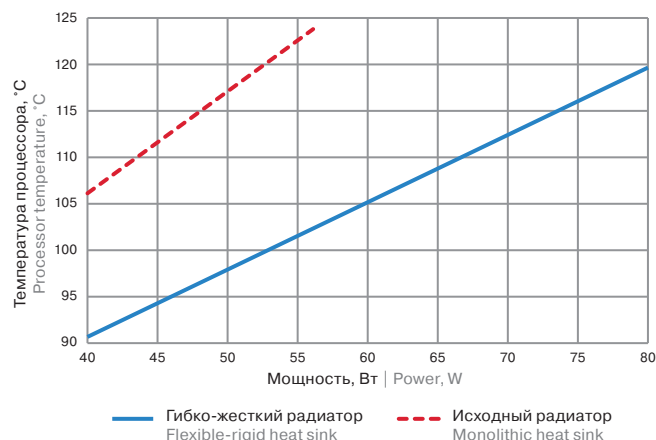


Рис. 7. Сравнение характеристик модулей
Fig. 7. Comparison of the characteristics of the modules

of the board. To determine the optimal configuration of the PCB in terms of cooling the processor, a number of calculations were carried out, whose parameters are given in Table 1.

The results of the calculations are presented in Fig. 3 and 4.

Analyzing the obtained graphs, we can conclude that a greater increase in the thermal conductivity of a printed circuit board can be obtained by increasing the thickness of the copper used. However, this change will also cause a significant increase in the board mass. Copper thickness has more influence on the planar coefficient of thermal conductivity. Increase in the thickness of copper to 1 oz has the greatest efficiency, the

subsequent increase in the thickness of copper is less effective.

WEDGE LOCK

The task of the wedge lock, in addition to fixing the computing module in the computer case, is to ensure reliable contact of the heat sink of the computing module with the computer case, in order to ensure the best heat transfer in the contact zone. The research of the influence of the parameters of the wedge lock was carried out in [5], whose calculated data were used in this work. The best in terms of cooling the module is a version of the wedge lock made of aluminum AD31T1 (analogue aluminum 6063-T6), with a coating made by chemical oxidation and a tightening

screw with a higher strength class, which allows tightening with a moment of 5.6 N/m. The analysis of the initial configuration of the PCB module and the improved wedge lock has shown the decrease in the processor temperature by 1.5%, or 1.9°C.

HEAT SINK

The main problem of a monolithic heat sink, as mentioned earlier, is low pressure on the processor cap, as well as the possible non-parallelism of the contacting heat transfer planes of the processor cap and the heat sink. This is due to the technological tolerances for soldering BGA chips, at which for a chip with a dimension of 31×31 pins the flatness deviation can reach 0.2 mm [6]. To improve



В целях улучшения теплоотвода типовой конструкции процессорного модуля 6U предложена гибко-жесткая конструкция радиатора, обеспечивающая необходимое прижатие радиатора к крышке корпуса микропроцессора. При расчете оптимизированной конструкции системы охлаждения материал и покрытие радиатора и клинового механизма заменены на более подходящие, имеющие лучшее тепловое сопротивление, — АД31Т1, медь и хим. никель соответственно. Изменение конструкции клинового механизма в целях увеличения усилия в зонах контакта позволило снизить тепловое сопротивление системы охлаждения. Выработаны подходы для повышения теплового потока через печатную плату при помощи модернизации сечения и заполнения медью сигнальных слоев при трассировке. Исследовано влияние применения предложенных методов на массу печатной платы.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: полученное значение максимальной рассеиваемой мощности улучшенной системы с кондуктивным охлаждением, которое составляет 73 Вт, является достаточным для охлаждения рассматриваемого процессорного модуля 6U с максимальным энергопотреблением в 56 Вт, обеспечивает требуемый уровень надежности (запас по температуре в 22,8°C) и подтверждает актуальность предлагаемых

подходов к обеспечению теплопередачи модуля 6U в корпусе магистрально-модульной системы типа SpaceVPX.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме №0065-2019-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. ANSI / VITA 78.00-2015 SpaceVPX System, American National Standards Institute, Inc., 2015.
2. ANSI / VITA 65-2010 OpenVPX™ System Specification, American National Standards Institute, Inc., 2010.
3. ANSI / VITA 48.2 Mechanical Specifications for Microcomputers Using REDI Conduction Cooling Applied to VITA VPX, American National Standards Institute, Inc., 2010.
4. MCL Material Catalog «Copper clad laminates», Hitachi Chemical Co., Ltd., 2018, URL: <http://www.hitachi-chem.co.jp> (дата обращения 25.07.2018).
5. Зуйков А. В., Воробьев А. А. Исследование влияния параметров клинового механизма на обеспечение теплоотвода модуля 6U в магистрально-модульной системе типа VPX // Труды НИИСИ РАН, 2018. — № 3.
6. Fine-pitch, Square Ball Grid Array Package (FBGA) Package-on-Package (PoP), JEDEC PUBLICATION 95, 2010.

the heat transfer from the processor cover, a flexible-rigid heat sink design was developed, whose design is shown in Fig. 5. A feature of this heat sink is that the main heat-conducting body is made not monolithic, but is assembled from copper sheets.

The main advantage of this heat sink is mobility from the side of the heat-absorbing surface and manufacturability. The disadvantages include a large mass compared to the monolithic heat sink. To achieve the optimum module mass-temperature of the processor ratio, a series of tests were made with different sizes of copper sheets for the heat sink, whose results are presented in Fig. 6.

To determine the minimum temperature of the processor provided by a set of all possible solutions, an analysis was made for the module with the following characteristics: rigidly flexible heat sink with 12 copper sheets, PCB with 76% copper filling and 1 oz conductive layers thickness, a wedge lock made of aluminum AD31T1 with coating made of chemical nickel plating. The result of these improvements was the achievement of a processor temperature of 102.2°C and a module mass of 784 grams. Besides, the mass of module with monolithic heat sink reaches 480 grams. The developed module configuration allowed increasing the maximum power dissipation of the module to 73 W. The results of the comparison of the original and modified modules are presented in Fig. 7.

CONCLUSIONS

The analysis results show that the maximum power dissipation of a typical system design with conductive cooling is 48 W, which in turn is insufficient for its use in modern modular systems, where the maximum power consumption of 6U modules is 50 W and above.

In order to improve the heat sink of the typical design of the 6U processor module, a flexible-rigid heat sink design was proposed, providing the necessary pressure of the heat sink on the microprocessor case cover. While analysing the optimized design of cooling system, the material and coating of the heat sink and wedge lock are replaced by more suitable, having better thermal resistance, aluminum AD31T1, copper and chemical oxidation coating, respectively. Changing the design of the wedge lock in order to increase the force in the contact zones allowed reducing the thermal resistance of the cooling system. Approaches have been developed to increase the heat flux through the printed circuit board by upgrading the cross section and filling copper with signal layers during tracing. The influence of the application of the proposed methods on the mass of the printed circuit board has been investigated.

The obtained value of the maximum power dissipation of an improved system with conductive cooling, which is 73 W, is sufficient for cooling the considered 6U processor module with a maximum power consumption of 56 W, provides the required level of reliability (temperature margin of 22.8°C) and confirms the

relevance of the proposed approaches to ensuring the heat transfer of the 6U module in the body of the modular system such as SpaceVPX.

The publication was carried out as part of the state assignment of the Federal State Institution FNC NIISI RAN (fundamental research) on the subject No. 0065-2019-0004.

REFERENCES

1. ANSI / VITA 78.00-2015 SpaceVPX System, American National Standards Institute, Inc., 2015.
2. ANSI / VITA 65-2010 OpenVPX™ System Specification, American National Standards Institute, Inc., 2010.
3. ANSI / VITA 48.2 Mechanical Specifications for Microcomputers Using REDI Conduction Cooling Applied to VITA VPX, American National Standards Institute, Inc., 2010.
4. MCL Material Catalog “Copper clad laminates”, Hitachi Chemical Co., Ltd., 2018, URL: <http://www.hitachi-chem.co.jp> (Retrieved 25.07.2018).
5. Zuikov A. V., Vorob'ev A. A. Issledovanie vliyaniya parametrov klinovogo mekhanizma na obespechenie teplootvoda modulya 6U v magistral'no-modul'noi sisteme tipa VPX // Trudy NIISI RAN № 3, 2018. (In Russian).
6. Fine-pitch, Square Ball Grid Array Package (FBGA) Package-on-Package (PoP), JEDEC PUBLICATION 95, 2010.