

DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-16-23

УДК 004.3.124

Разработка системы охлаждения для модуля 6U на базе микропроцессора «Эльбрус»

Ш. М. Сажо¹, В. В. Воробушков^{1, 2}, А. С. Гладких¹, С. В. Сенченков¹

¹ АО «МЦСТ», Москва, Россия

² ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука», Москва, Россия

В статье рассматриваются особенности проектирования систем охлаждения для компактных модулей конструктива «Евромеханика» на базе микропроцессора серии «Эльбрус». Решена задача обеспечения необходимого теплового режима работы процессорного модуля в условиях дефицита пространства для размещения системы охлаждения. Произведенный оценочный расчет показал недостаточность пассивного охлаждения микропроцессора «Эльбрус-4С» с тепловыделением 60 Вт. В связи с этим была разработана 3D-модель активной системы охлаждения с габаритами 5,5×10,3×4,6 см. Для оптимизации геометрии радиатора и скорости вращения вентилятора произведены тепловые расчеты с помощью программы SolidWorks Flow Simulation, по результатам которых предполагалось, что оптимизированная система охлаждения обеспечит температуру на кристалле процессора «Эльбрус-4С» не более +87 °С (при температуре окружающей среды +55 °С). С учетом результатов исследования для проведения испытаний было изготовлено три опытных образца. Дальнейшие испытания, проведенные на опытных образцах, показали эффективность системы охлаждения и высокую точность результатов моделирования. Во время испытаний в климатической камере при температуре +55 °С температура на кристалле микропроцессора не превысила +84 °С (разница в 3 °С по сравнению с расчетной).

Ключевые слова: Евромеханика, микропроцессор Эльбрус, система охлаждения, тепловое сопротивление, ребристый радиатор, SolidWorks Flow Simulation

Для цитирования:

Разработка системы охлаждения для модуля 6U на базе микропроцессора «Эльбрус» / Ш. М. Сажо, В. В. Воробушков, А. С. Гладких, С. В. Сенченков // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 1. С. 16–23. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-16-23

© Сажо Ш. М., Воробушков В. В., Гладких А. С., Сенченков С. В., 2020



Development of a cooling system for 6U module based on Elbrus microprocessor

Sh. M. Sazho¹, V. V. Vorobushkov^{1, 2}, A. S. Gladkih¹, S. V. Senchenkov¹

¹ MCST JSC, Moscow, Russia

² Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, Moscow, Russia

The article discusses the design features of cooling systems for compact Eurocard format modules based on the Elbrus microprocessor. The issue of ensuring the necessary thermal regime of the processor module in the space shortage conditions in order to accommodate the cooling system has been solved. The estimated calculation showed the underperformance of the passive cooling of the Elbrus-4S microprocessor with a heat output of 60 W. In this regard, a 3D model of an active cooling system with 5.5×10.3×4.6 cm dimensions was developed. Thermal calculations were performed using the SolidWorks Flow Simulation program in order to optimize the radiator geometry and fan speed. It was assumed that an optimized cooling system will ensure that the chip temperature of the Elbrus-4S processor is no more than +87 °C (at an ambient temperature of +55 °C). Based on the results of the study, three prototypes were produced for testing. Further tests conducted on prototypes showed the efficiency of the cooling system and the high accuracy of the simulation results. During tests in a climatic chamber at a temperature of +55 °C, the temperature on the microprocessor chip did not exceed +84 °C (a difference of 3 °C compared to the estimated one).

Keywords: Eurocard, Elbrus microprocessor, cooling system, thermal resistance, finned heat sink, SolidWorks Flow Simulation

For citation:

Sazho Sh. M., Vorobushkov V. V., Gladkih A. S., Senchenkov S. V. Development of a cooling system for 6U module based on Elbrus microprocessor. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 1, pp. 16–23. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-1-16-23

Введение

Задача проектирования системы охлаждения возникла при модернизации вычислительного комплекса, реализованного в компактном исполнении конструктива «Евромеханика». В первую очередь изменениям подвергся процессорный модуль, построенный на базе двух устаревших микропроцессоров 1891BM4Я («Эльбрус»). Новый процессорный модуль был разработан на базе современного микропроцессора 1891BM8Я («Эльбрус-4С») [1], тепловыделение которого значительно выше. Характеристики микропроцессоров представлены в таблице.

В данной статье рассматривается проблема проектирования систем охлаждения для высокопроизводительных модулей конструктива «Евромеханика», описывается пример разработки системы охлаждения с применением системы автоматизированного проектирования.

Проблема охлаждения процессорного модуля

Суммарное тепловыделение двух микропроцессоров «Эльбрус», использовавшихся в первой версии процессорного модуля, составляет 12 Вт. Для их охлаждения было достаточно применения алюминиевых радиаторов, обдуваемых общеобменными вентиляторами, установленными

в корпусе вычислительного комплекса (рис. 1). Новый процессорный модуль построен на базе микропроцессора «Эльбрус-4С» с тепловыделением до 60 Вт.

Увеличение тепловыделения модуля в пять раз не позволяло применить решение с общим обдувом и потребовало создания принципиально новой системы охлаждения, однако из-за дефицита свободного пространства реализация новой системы охлаждения была невозможна. В связи с этим было принято решение об объединении функционалов процессорного модуля и соседнего интерфейсного на одном модуле, что дало возможность увеличить ширину модуля с 8 НР до 12 НР (61 мм) [2].

Разработка системы охлаждения для модуля 6U12НР

В соответствии с техническими требованиями вычислительный комплекс должен функционировать с выключенным блоком вентиляции при температуре окружающей среды $T_{\text{окр}} = +55$ °C. Предельная рабочая температура на кристалле микропроцессора «Эльбрус-4С» $T_{\text{крист}} = +95$ °C, тепловыделение процессора $P_{\text{проц}} = 60$ Вт. Таким образом, необходимо было разработать систему охлаждения, которая обеспечила бы тепловое сопротивление R между кристаллом микропроцессора и окружающей средой не более

Таблица. Характеристики микропроцессоров «Эльбрус»
Table. Elbrus microprocessors characteristics

Параметр / Parameter	Микропроцессор / Microprocessor	
	1891ВМ4Я	1891ВМ8Я
Число ядер / Cores	1	4
Рабочая тактовая частота, МГц / Clock rate, MHz	300	800
Кэш-память данных 1-го уровня (на ядро), Кбайт / Level 1 data cache (per core), KB	64	64
Кэш-память команд 1-го уровня (на ядро), Кбайт / Level 1 cache of instructions (per core), KB	64	128
Кэш-память 2-го уровня (универсальная), Кбайт / Level 2 cache (universal), KB	256	8192
Организация оперативной памяти / RAM organization	DDR2 ECC	До трех каналов DDR3 ECC / Up to three DDR3 ECC channels
Пропускная способность каналов оперативной памяти, Гб/с / RAM bandwidth, GB/s	4,8	38,4
Возможность объединения в многопроцессорную систему с когерентной общей памятью / Ability to combine into a multiprocessor system with coherent shared memory	До двух процессоров / Up to two processors	До четырех процессоров / Up to four processors
Технологический процесс, нм / Technological process, nm	130	65
Количество транзисторов, млн шт. / Number of transistors, million units	75,8	986
Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W	До 6 / Up to 6	До 60 / Up to 60

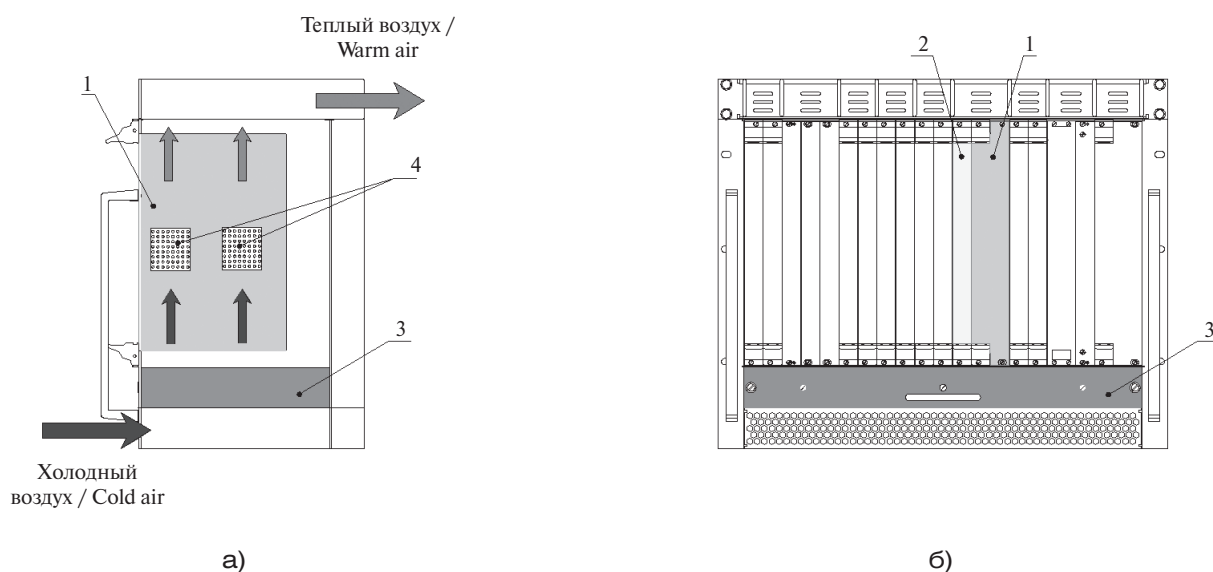


Рисунок 1. Модернизируемый вычислительный комплекс: а – вид сбоку в разрезе; б – вид спереди; 1 – процессорный модуль; 2 – интерфейсный модуль; 3 – блок вентиляции; 4 – процессорные радиаторы

Figure 1. Upgraded computing complex: a – sectional side view; b – front view; 1 – processor module; 2 – interface module; 3 – ventilation unit; 4 – processor heat sinks

$$R = \frac{T_{\text{крист}} - T_{\text{окр}}}{P_{\text{проц}}} = \frac{95 - 55}{60} = 0,67 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт},$$

при этом габариты системы охлаждения не должны превышать 56×104×51 мм.

Существует несколько основных методов оценки эффективности систем охлаждения [3]:

1. Методики, базирующиеся на экспериментально определенных коэффициентах.
2. Численные методы с применением системы автоматизированного проектирования.
3. Экспериментальный метод.

Первый способ применяется для оценки эффективности системы охлаждения и включает, как правило, большое количество математических расчетов.

Численный метод с применением системы автоматизированного проектирования позволяет решать задачи различной сложности, учитывать гравитацию, тепловое излучение, турбулентности и т. д. Однако в сложных задачах данный способ требует большой вычислительной мощности, а также имеет такой недостаток, как высокая стоимость системы автоматизированного проектирования.

Экспериментальный метод является затратным по времени и материальным ресурсам, однако позволяет получить наиболее достоверный результат.

В условиях поставленной задачи требовалось определить, достаточно ли применения ребристого

радиатора без обдува для отвода 60 Вт тепла. Для этого была создана рекомендуемая для естественной конвекции конфигурация радиатора с толщиной основания 8 мм, толщиной ребра 1 мм, зазором между ребрами 5 мм [4] (процессорный модуль показан на рис. 2). Был произведен расчет рассеиваемой мощности радиатора с помощью методики, базирующейся на экспериментально определенных коэффициентах [5]:

$$Q = 4,187 \cdot 10^{-4} h_c S \Delta t,$$

$$h_c = 0,52 C \left(\frac{55 \Delta t}{l} \right)^{0,2},$$

где Q – количество рассеиваемой теплоты, Вт; h_c – коэффициент конвективной теплопередачи; S – площадь поверхности, см²; Δt – перегрев, °C; l – длина пути теплового потока, см; C – постоянная, зависящая от ориентации поверхности.

Расчет показал, что охлаждение микропроцессора естественной конвекцией позволяет отводить лишь 20 Вт тепла (при окружающей температуре +55 °C), а для отвода 60 Вт тепла необходимо использовать принудительную конвекцию. В программе SolidWorks была создана 3D-модель системы охлаждения (рис. 3), которая включает:

- теплообменник в виде ребристого радиатора из алюминия;
- вентилятор для создания воздушного потока в системе охлаждения. На основе данных

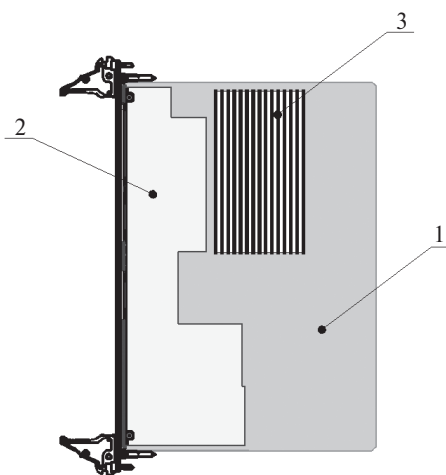


Рисунок 2. Процессорный модуль с пассивным охлаждением: 1 – процессорная плата; 2 – интерфейсная плата; 3 – радиатор
Figure 2. Processor module with passive cooling: 1 – processor board; 2 – interface board; 3 – radiator

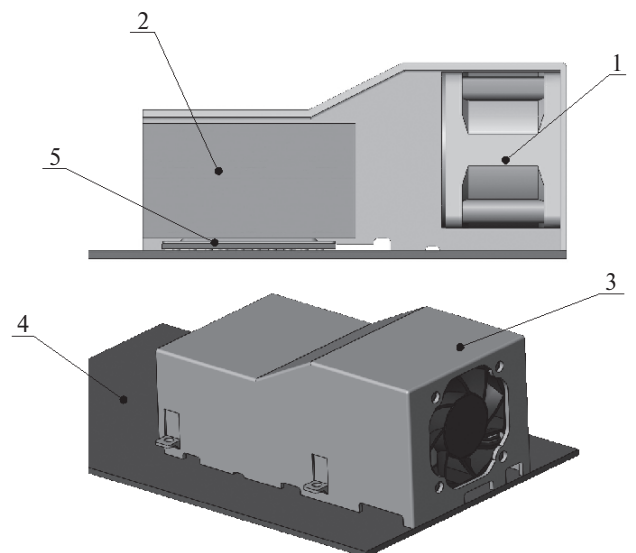


Рисунок 3. 3D-модель системы охлаждения: 1 – вентилятор; 2 – радиатор; 3 – воздуховод; 4 – печатная плата; 5 – микропроцессор
Figure 3. 3D model of the cooling system: 1 – fan; 2 – radiator; 3 – air duct; 4 – printed circuit board; 5 – microprocessor

о производительности был выбран компактный высокооборотный вентилятор 9GA0312P3K001 (38×38×28 мм) фирмы Sanyo Denki;

- воздуховод из АБС-пластика для создания направленного потока воздуха, изготовленный на 3D-принтере.

Для оценки эффективности предложенной системы охлаждения удобнее всего было применить метод численного анализа, реализованный в системе автоматизированного проектирования. Этот метод позволяет оптимизировать параметры системы. В нашем случае необходимо было оптимизировать геометрию ребристого радиатора. Для решения поставленных задач использовалась программа SolidWorks Flow Simulation.

Для более точного результата моделирования была создана 3D-модель микропроцессора «Эльбрус-4С» (рис. 4). В модели учтены тепловые

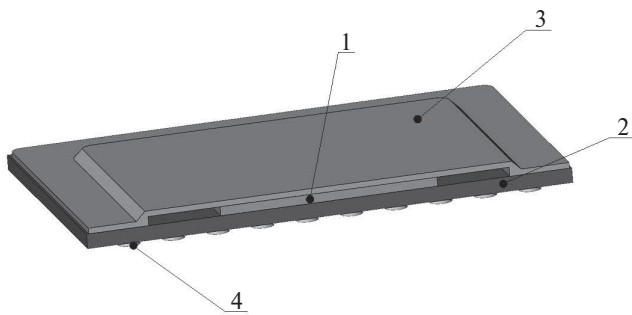


Рисунок 4. 3D-модель микропроцессора (в разрезе): 1 – кристалл; 2 – коммутационная плата; 3 – теплораспределительная пластина; 4 – оловянно-свинцовые шарики
Figure 4. 3D model of the microprocessor (section): 1 – chip; 2 – patch board; 3 – heat distribution plate; 4 – tin-lead balls

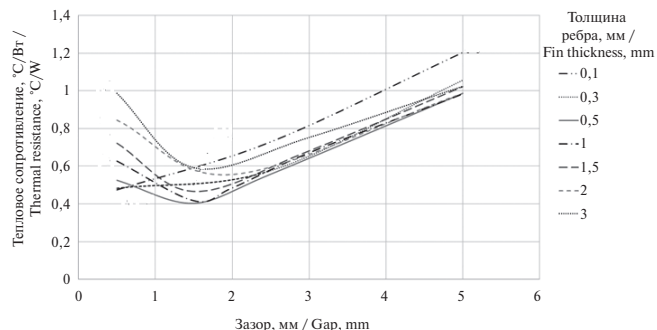


Рисунок 5. Графики зависимости теплового сопротивления от величины зазора между ребрами при различной толщине ребер
Figure 5. Graphs of thermal resistance dependency on the gap between the fins for different thicknesses of fins

сопротивления терморасты между кристаллом и теплораспределительной крышкой, между крышкой и радиатором. Для ускорения процесса расчета оловянно-свинцовые шарики увеличены в размерах, но их количество уменьшено для сохранения площади соприкосновения.

По результатам моделирования получены значения теплового сопротивления системы охлаждения в зависимости от величины зазора между ребрами радиатора при различной толщине ребер (рис. 5). Толщина основания принята равной 3 мм для упрощения расчета.

Как видно из графиков, наиболее предпочтительно использование радиатора с ребрами толщиной 0,5 мм и зазором 1,5 мм. Однако мелкосерийное производство подобного радиатора экономически нецелесообразно в связи с необходимостью изготовления дорогостоящей оснастки. Оптимальным выбором с учетом производственных возможностей при малой серийности является изготовление радиатора методом фрезерования с зазором 2 мм и толщиной ребра 1 мм.

Для выбранной конфигурации были произведены расчеты теплового сопротивления с различными значениями толщины основания радиатора (рис. 6). Как видно из графика, вклад в тепловое сопротивление толщины основания не столь значителен. Разница в значениях теплового сопротивления составила всего 0,035 °C/W при изменении толщины от 2 до 8 мм. Выбранная изначально толщина основания 3 мм оказалась приемлемой для обеспечения требуемого теплового сопротивления.

По результатам моделирования были выбраны следующие параметры радиатора:

- толщина основания – 3 мм;
- толщина ребра – 1 мм;
- зазор между ребрами – 2 мм.

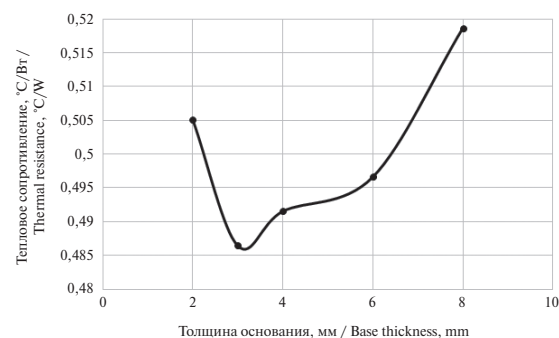


Рисунок 6. График зависимости теплового сопротивления от толщины основания радиатора
Figure 6. Graph of thermal resistance dependency on the thickness of radiator base

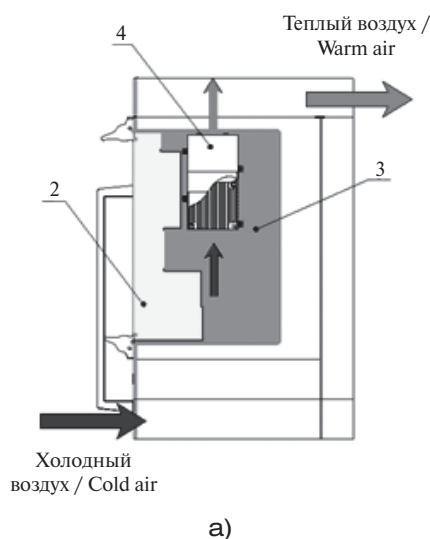
Результаты моделирования при температуре окружающей среды +55 °С представлены на рис. 7. Температура на кристалле микропроцессора составила +82 °С. Тепловое сопротивление кристалл – окружающая среда:

$$R = \frac{T_{\text{крист}} - T_{\text{окр}}}{P_{\text{проц}}} = \frac{82 - 55}{60} = 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Модернизированный вычислительный комплекс показан на рис. 8. Поскольку его использование предполагает присутствие рабочего персонала, то является актуальной задача снижения уровня шума. Так как по результатам моделирования запас по допустимой температуре на кристалле составил 13 °С, то имелась возможность уменьшить количество оборотов вентилятора на процессорном модуле, что привело бы к снижению уровня шума вычислительного комплекса. Для решения данной задачи требовалось выяснить зависимость температуры на кристалле микропроцессора от скорости вращения вентилятора.

В программу SolidWorks Flow Simulation были внесены графики расхода воздуха вентилятора, работающего на 25, 50 и 75% от максимальной скорости. Для этого использовались следующие зависимости [6]:

- изменение давления пропорционально квадрату изменения скорости вращения вентилятора;
- изменение расхода воздуха пропорционально изменению скорости вращения вентилятора.



По результатам моделирования был построен график зависимости температуры на кристалле от скорости вращения вентилятора (рис. 9). Оптимальная скорость вращения вентилятора составила 65% от максимальной скорости. В соответствии с графиком (рис. 10) [7] данная скорость соответствует 45% заполнения управляющего ШИМ-сигнала (широтно-импульсная модуляция). Температура на кристалле при этом составляет +87 °С.

Сравнение результатов моделирования с фактическими измерениями

Для проведения испытаний с учетом результата исследования была разработана конструкторская документация и изготовлено три опытных образца. С целью определения эффективности системы охлаждения производились эксперименты в климатической камере при +55 °С, которые показали,

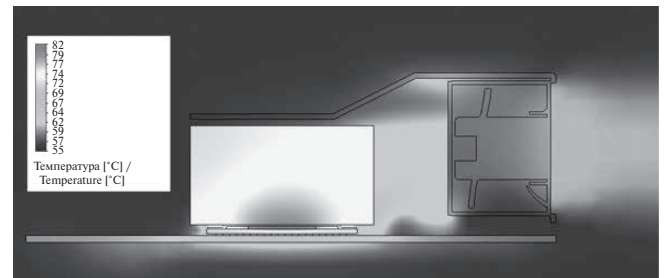


Рисунок 7. Температурный градиент в сечении системы охлаждения
Figure 7. Temperature gradient in the cross-section of the cooling system

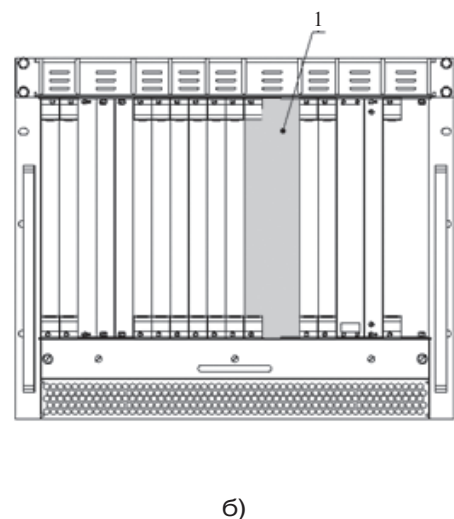


Рисунок 8. Модернизированный вычислительный комплекс: а – вид сбоку в разрезе; б – вид спереди; 1 – процессорный модуль; 2 – интерфейсная плата; 3 – процессорная плата; 4 – система охлаждения

Figure 8. The upgraded computing complex: a – sectional side view; b – front view; 1 – processor module; 2 – interface board; 3 – processor board; 4 – cooling system

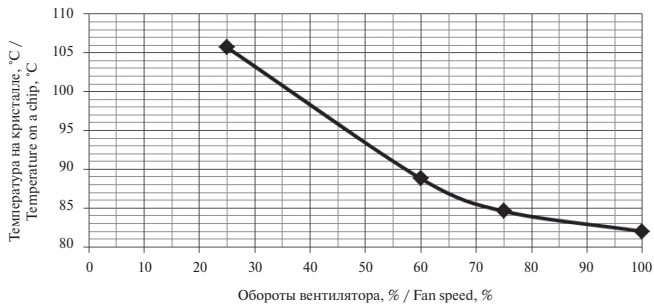


Рисунок 9. График зависимости температуры на кристалле от скорости вращения вентилятора
Figure 9. Graph of chip temperature dependency on fan speed

что при 100% оборотах вентилятора температура на кристалле микропроцессора составляет +80 °C (разница в 2 °C с расчетной), а при 65% оборотах вентилятора – +84 °C (разница в 3 °C с расчетной). Таким образом, результаты продемонстрировали высокую точность моделирования и достоверность тепловых расчетов.

Выводы

Модернизированный вычислительный комплекс успешно прошел типовые испытания, кон-

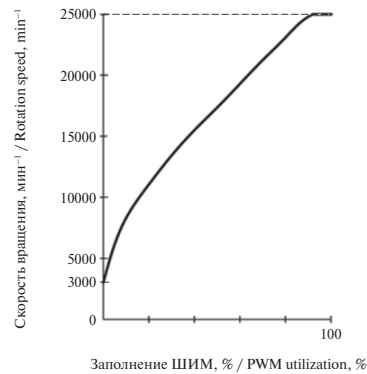


Рисунок 10. График зависимости скорости вращения вентилятора от коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала
Figure 10. Graph of fan speed dependency on the duty cycle of the control pulse-width modulation

структорской документации присвоена литера О1. В настоящий момент данное изделие поставлено на серийное производство. Разработанная система охлаждения доказала свою эффективность. Созданная тепловая модель позволила в сжатые сроки спроектировать вычислительный комплекс и сэкономить средства на экспериментальном макетировании и дополнительных итерациях производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // Приборы. 2018. № 8 (218). С. 14–20.
2. IEC 60297-3-101:2004 Mechanical structures for electronic equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series – Part 3-101: Subracks and associated plug-in units. International Standard, 2004, 45 p.
3. Маниленко И.Н. Разработка методики проектирования ребристо-пластинчатых радиаторов радиоэлектронных устройств: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.12.04). Владимир: ВлГУ, 2012. 123 с.
4. Роткоп Б.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М: Советское радио, 1976. 230 с.
5. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высшая школа, 1990. 432 с.
6. Вахвахов Г.Г. Работа вентиляторов в сети. М.: Стройиздат, 1975. 101 с.
7. Cooling fan San Ace [Электронный ресурс]. URL: https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog_E_pdf/San_Ace_E.pdf#page=1 (дата обращения: 09.01.2020).

REFERENCES

1. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Computing equipment based on the Elbrus hardware-software platform for advanced information systems. *Pribory*, 2018, no. 8 (218), pp. 14–20. (In Russian).
2. IEC60297–3–101:2004 Mechanical structures for electronic equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series – Part 3–101: Subracks and associated plug-in units. International Standard, 2004, 45 p.
3. Manilenko I.N. *Razrabotka metodiki proektirovaniya rebristo-plastinchatykh radiato-rov radioehlektronnykh ustroystv: diss. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk* (05.12.04) [Development of design methods for finned radiators of electronic devices: Ph.D. thesis in Engineering Science (05.12.04)]. Vladimir, VLGU Publ., 2012, 123 p. (In Russian).
4. Rotkop B. E. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioehlektronnoi apparatury* [Providing thermal conditions in the design of electronic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976, 230 p. (In Russian).
5. Nenashev A. P. *Konstruirovaniye radioehlektronnykh sredstv* [Design of electronic equipment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 432 p. (In Russian).
6. Vakhvakhov G. G. *Rabota ventilyatorov v seti* [The network operation of fans]. Moscow, Stroizdat Publ., 1975, 101 p. (In Russian).
7. Cooling fan San Ace. Available at: https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog_E_pdf/San_Ace_E.pdf#page=1 (accessed 09.01.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сажо Шамиль Мадинович, инженер-конструктор, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (495) 796-94-52, e-mail: Shamil.M.Sazho@mcst.ru.

Воробушков Василий Владимирович, к. т. н., исполнительный директор, АО «МЦСТ», ведущий инженер, ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (495) 797-81-90, e-mail: Vasily.V.Vorobushkov@mcst.ru.

Гладких Александр Сергеевич, заместитель генерального директора по производству, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (495) 363-95-03, e-mail: gladkih@mcst.ru.

Сенченков Сергей Вячеславович, начальник отделения, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (495) 363-95-57, e-mail: Sergey.V.Senchenkov@mcst.ru.

AUTHORS

Shamil M. Sazho, design engineer, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (495) 796-94-52, e-mail: Shamil.M.Sazho@mcst.ru.

Vasilii V. Vorobushkov, Ph.D. (Engineering), executive director, MCST JSC, lead engineer, Institute of Electronic Control Computers named after I. S. Brook, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, tel.: +7 (495) 797-81-90, e-mail: Vasily.V.Vorobushkov@mcst.ru.

Aleksandr S. Gladkih, deputy general director for production, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (495) 363-95-03, e-mail: gladkih@mcst.ru.

Sergei V. Senchenkov, division manager, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (495) 363-95-57, e-mail: Sergey.V.Senchenkov@mcst.ru.

Поступила 30.10.2019; принята к публикации 20.12.2019; опубликована онлайн 25.02.2020.

Submitted 30.10.2019; revised 20.12.2019; published online 25.02.2020.