

Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В.

ФГБОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет»,
пр. имама Шамиля, 70, Махачкала, 367015, Россия

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА
СИСТЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ**

В работе дано описание опытного образца системы неравномерного охлаждения электронных плат, экспериментального стенда для проведения его натуральных испытаний. Приведены соответствующие результаты экспериментальных исследований. В результате натуральных испытаний определено, что неравномерное охлаждение электронных плат имеет преимущество перед равномерным по энергетическим и массогабаритным показателям. Установлено, что при использовании разработанной системы на практике требуется оптимизация между током питания термоэлектрических батарей и количеством используемого рабочего вещества.

Ключевые слова: опытный образец, экспериментальный стенд, натурные испытания, электронная плата, термоэлектрический модуль, неравномерный теплоотвод, плавящееся вещество.

This paper is concerned with a description of a prototype system for non-uniform cooling of electronic boards and a test bench for conducting its full-scale test. The respective results of experimental research are given. Based on the full-scale test it has been determined that non-uniform cooling of electronic boards is superior to uniform one in the energy and mass-dimensional parameters. It has been established that practical use of the elaborated system requires optimizing between thermopile supply current and the amount of working agent used.

Key words: prototype, test bench, full-scale test, electronic board, thermoelectric module, non-uniform heat removal, melting agent.

Введение

Одними из наиболее распространенных элементов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются электронные платы. Среди них в зависимости от размещения проводящего рисунка выделяются односторонние, двусторонние и многослойные. Несмотря на тип электронной платы, основной их особенностью является рассредоточение по площади тепловыделяющих элементов. В настоящее время отвод тепла от тепловыделяющих компонентов указанных систем осуществляется при помощи воздушного, жидкостного, испарительного, термоэлектрического охлаждения. Перечень некоторых фирм – производителей такого оборудования приведен в табл. 1. Анализируя выпускаемую ими продукцию применительно к отводу теплоты от электронных плат, характеризующихся неравномерным по поверхности уровнем тепловыделений, необходимо отметить, что системы охлаждения РЭА на основе воздушного и кондуктивного методов являются малоэффективными вследствие низкой интенсивности теплоотвода и точности поддержания температуры на требуемом уровне. Жидкостные и испарительные системы отвода тепла сложны для реализации, требуют

громоздкого и сложного в конструктивном исполнении оборудования. Термоэлектрические охладители в основном реализуют равномерный отвод теплоты от всех компонентов электронной платы и также не являются эффективными в данном контексте применения.

Поэтому, основываясь на ярко выраженной неравномерности температурного поля электронных плат, авторами [20] предложена система охлаждения их компонентов, учитывающая этот фактор.

Таблица 1

№ п/п	Компании	Тип производимой продукции	Ссылки на литературу
1	2	3	4
1.	AAVID Thermalloy (США)	Жидкостные охладители и воздушные радиаторы	[1]
2.	Лигра (Россия)	Радиаторы игольчатые и пластинчатые	[2]
3.	Протон-электротекс (Россия)	Радиаторы игольчатые и пластинчатые	[3]
4.	Summit Heat Sinks Metal Co. (Тайвань)	Радиаторы игольчатые и пластинчатые	[4]
5.	Alutronik (Германия)	Радиаторы игольчатые и пластинчатые, корпуса для РЭА	[5]
6.	ThermoFlow (США)	Радиаторы всех типов	[6]
7.	Melcor (США)	Термоэлектрические системы охлаждения	[7]
8.	Marlow Inc. (США)	Термоэлектрические системы охлаждения	[8]
9.	FerroTec. (США)	Термоэлектрические системы охлаждения	[9]
10.	Fandis (Италия)	Термоэлектрические системы охлаждения	[10]
11.	Komatsu Electronics (Япония)	Термоэлектрические системы охлаждения	[11]
12.	Криотерм (Россия)	Термоэлектрические системы охлаждения	[12]
13.	Остерм (Россия)	Термоэлектрические системы охлаждения	[13]
14.	РМТ (Россия)	Термоэлектрические системы охлаждения	[14]
15.	Evercool (Тайвань)	Вентиляторные агрегаты, жидкостные системы	[15]
16.	Titan (Тайвань)	Вентиляторные агрегаты, жидкостные системы	[16]
17.	Zalman (Южная Корея)	Вентиляторные агрегаты, жидкостные системы	[17]
18.	Sunon (Тайвань)	Вентиляторные агрегаты, жидкостные системы	[18]
19.	Thermaltake (Тайвань)	Вентиляторные агрегаты, жидкостные и испарительные системы	[19]

Схематическое изображение прибора приведено на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

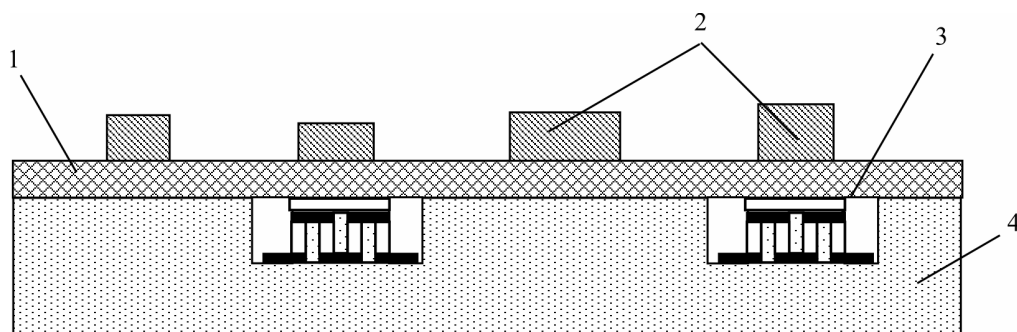


Рис. 1. Схема охлаждения электронной платы при совместном использовании плавящихся рабочих веществ и термоэлектрических батарей (ТЭБ): 1 – электронная плата, 2 – радиодетали, 3 – ТЭБ, 4 – емкость с плавящимся рабочим веществом.

Устройство содержит металлическую емкость, заполненную рабочим веществом, имеющим большое значение теплоты плавления и температуру плавления в диапазоне 35 – 65 °С (например, парафин, воск, азотнокислый никель и др.). Поверхность емкости, на которую устанавливается электронная плата с соответствующими тепловыделяющими элементами РЭА, выполнена профилированной с образованием углублений в местах размещения наиболее критичных к температурному режиму функционирования или требующих существенного снижения температуры элементов РЭА. В указанных углублениях установлены ТЭБ, питаемые энергией от источника постоянного электрического тока. Размеры углублений подбираются таким образом, чтобы они соответствовали размерам ТЭБ.

При функционировании прибора тепло, поступающее от элементов РЭА, установленных на электронной плате, передается металлической емкости и через поверхность соприкосновения – рабочему веществу. Далее происходит прогрев рабочего вещества до температуры плавления и процесс плавления, сопровождающийся поглощением теплоты, расходуемой на изменение агрегатного состояния вещества. Теплоотвод за счет изменения агрегатного состояния рабочего вещества является базовым и может быть использован для обеспечения необходимого температурного режима функционирования элементов РЭА, не требующих существенного снижения температуры, либо не критичных к существенной величине перегрева по отношению к окружающей среде. Для охлаждения элементов РЭА, особо критичных к перегревам или требующих существенного снижения температуры, используются ТЭБ, которые организуют дополнительный теплосъем, причем величина холодопроизводительности каждой ТЭБ определяется в соответствии с уровнем тепловыделений конкретного элемента РЭА. При этом отвод теплоты от горячих спаев ТЭБ осуществляется также в содержащееся в емкости рабочее вещество, количество которого рассчитывается исходя из длительности функционирования элементов РЭА, мощности их тепловыделений, теплопроизводительности ТЭБ, а также условий эксплуатации.

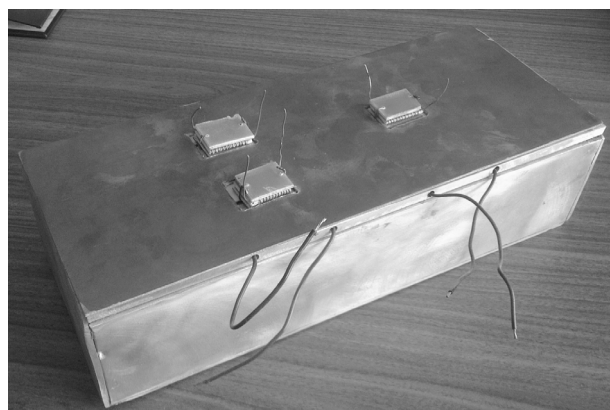


Рис. 2. Внешний вид устройства для охлаждения электронных плат с имитатором электронной платы.

Для снятия характеристик прибора собран экспериментальный стенд, схематически изображенный на рис. 3.

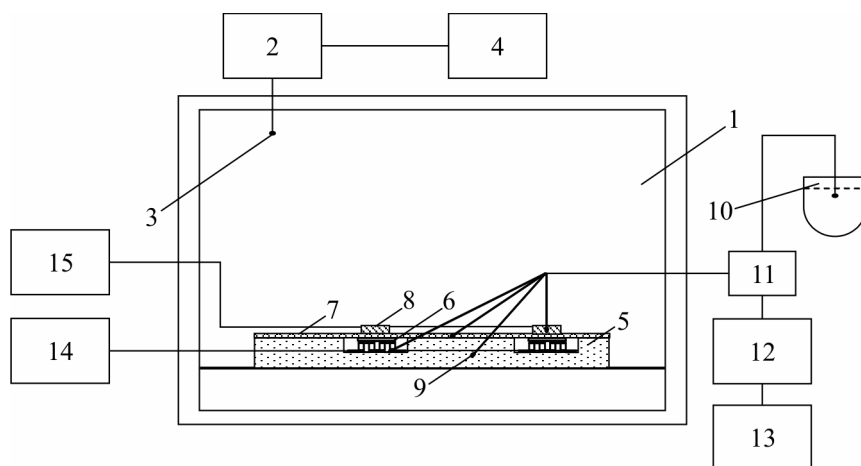


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментального стенда.

Исследования осуществлялись в теплоизолированной климатической камере 1, термостатируемый рабочий объем которой составляет 120 л. Камера обеспечивает поддержание температуры в пределах от 283 до 343 К с точностью 0,2 °С и относительной влажности от 30 % до 98 %. Заданная температура и относительная влажность в камере регулируются блоком управления 2, связанным с датчиком температуры и влажности 3, показания которого регистрируются цифровым табло 4.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий емкость 5, заполненную рабочим веществом – парафином. Верхняя поверхность емкости выполнена профилированной с образованием двух пазов, в которых размещены стандартные (термоэлектрические модули) ТЭМ 6 типа DRIFT-08. Место расположения пазов соответствует размещению на имитаторе электронной платы 7 тепловыделяющих элементов 8, в качестве которых применялись плоские нихромовые электронагреватели. Топология размещения на имитаторе электронной платы тепловыделяющих элементов показана на рис. 4. Имитатор соответствует проектируемой электронной плате высокочастотного усилителя мощности ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Плешакова» (Россия, Республика Дагестан, г. Избербаш).

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях замерялись следующие величины: напряжение и ток на ТЭМ; температуры на их спаях; напряжение и ток на нагревателях; температуры в контрольных точках имитатора электронной платы, включая нагреватели, оболочки емкости с рабочим веществом.

Температуры на горячей и холодной сторонах ТЭМ, а также в контрольных точках имитатора электронной платы, измерялись медь-константановыми термопарами 9, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 10. Выходные сигналы с термодпар через многоканальный переключатель 11 поступали на измерительный комплекс ИРТМ 12, к выходу которого подключалась персональная ЭВМ 13, регистрирующая показания измеряемых температур через заданный промежуток времени. Питание ТЭМ осуществлялось регулируемым источником постоянного тока 14. Ток, проходящий через ТЭМ, и напряжение на нем контролировались встроенными в блок питания приборами. Для питания имитаторов тепловой нагрузки (электронагревателей) использовался аналогичный источник постоянного тока 15.

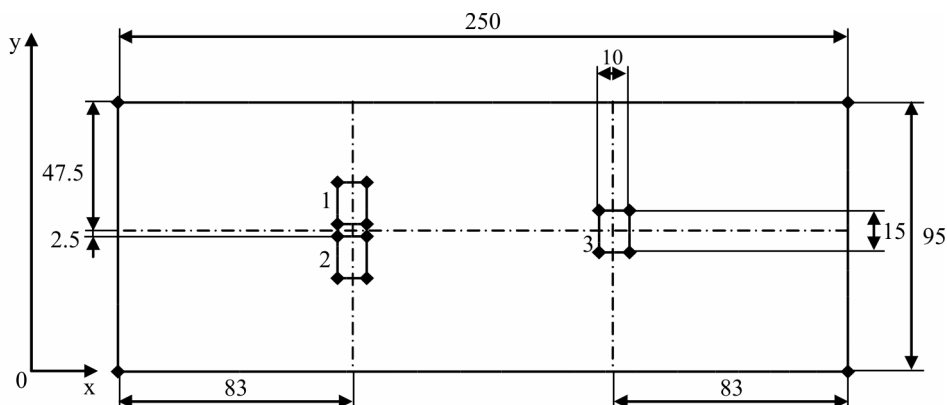


Рис. 4. Топология имитатора электронной платы.

Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их неравномерном охлаждении от параметров ТЭМ и рабочего вещества, а также изменение во времени температуры оболочки емкости с рабочим агентом. Важным являлось сравнение экспериментальных данных с теоретическими.

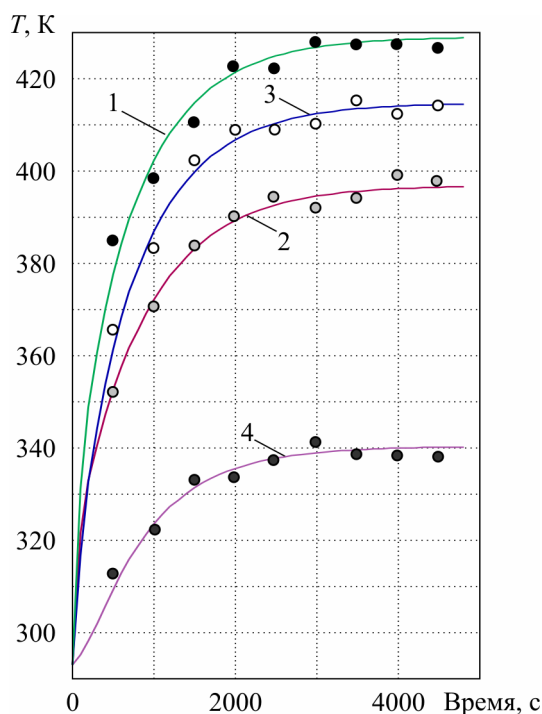


Рис. 5. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт.

1 – температура источника теплоты 1;
 2 – температура источника теплоты 3;
 3 – температура при $x = 125$ мм, $y = 47.5$ мм;
 4 – температура при $x = 17$ мм, $y = 14$ мм.

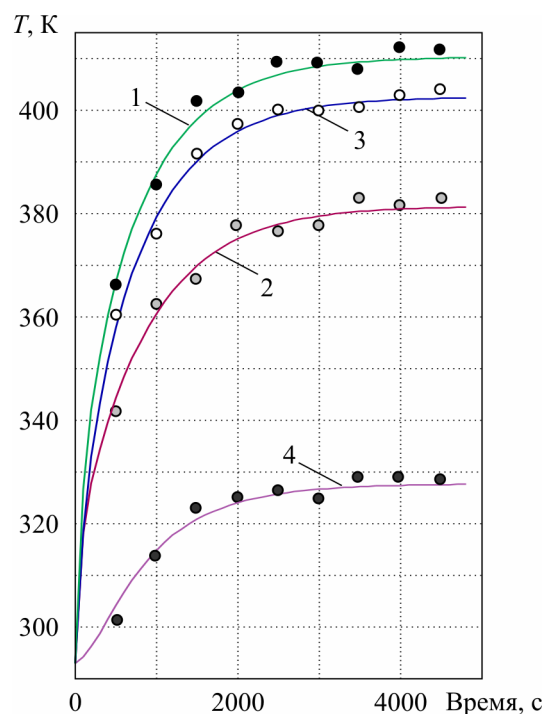


Рис. 6. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 100 Вт.

1 – температура источника теплоты 1;
 2 – температура источника теплоты 3;
 3 – температура при $x = 125$ мм, $y = 47.5$ мм;
 4 – температура при $x = 17$ мм, $y = 14$ мм.

На рис. 5 – 6 представлены экспериментальные зависимости изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени без системы охлаждения при

различных мощностях. Для сравнения там же приведены теоретические графики, полученные на основе разработанной математической модели [21]. Согласно представленным данным температура тепловыделяющих элементов значительно повышается. Так, для источника теплоты 1 (см. рис. 2) в стационарном режиме ее значение составляет 428 К при мощности тепловыделений 120 Вт и 410 К при мощности тепловыделений 100 Вт (те же значения температуры и для тепловыделяющего элемента 2), а для источника теплоты 3 соответственно – 396 К и 382 К. При этом также велика температура в областях имитатора электронной платы, близлежащих к источникам теплоты. На рис. 5 – 6 ее значение составляет 415 К и 403 К, что говорит о наличии значительного температурного фона, который может сказаться на работе элементов электронной платы – служить причиной выхода их из строя.

На рис. 7 – 8 приведены графики изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени при использовании опытного образца системы охлаждения. Согласно представленным данным применение охлаждающей системы уменьшает температуру тепловыделяющих элементов до приемлемых значений. Для случая, соответствующего рис. 7, температура источников теплоты снижается до 345 К и 344 К, а для рис. 8 – до 334 К и 333 К. При этом также снижается температурный фон, создаваемый тепловыделяющими элементами в близлежащих к ним областях имитатора электронной платы.

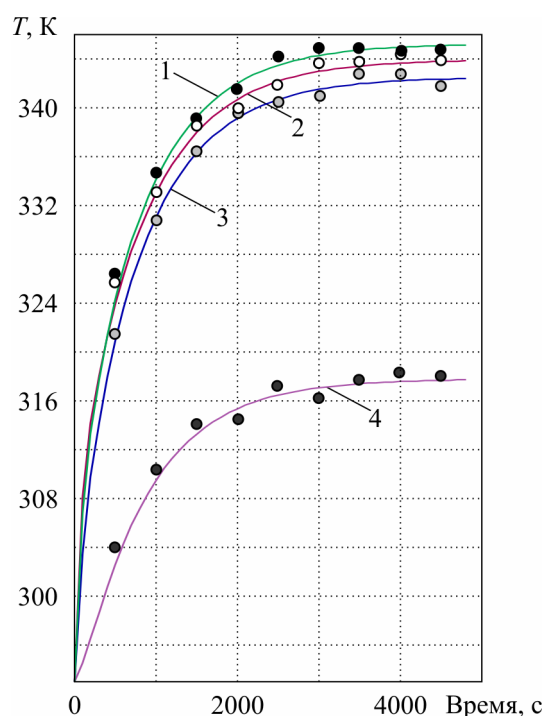


Рис. 7. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт и токе питания ТЭБ 10 А.

- 1 – температура источника теплоты 1;
- 2 – температура источника теплоты 3;
- 3 – температура при $x = 125$ мм, $y = 47.5$ мм;
- 4 – температура при $x = 17$ мм, $y = 14$ мм.

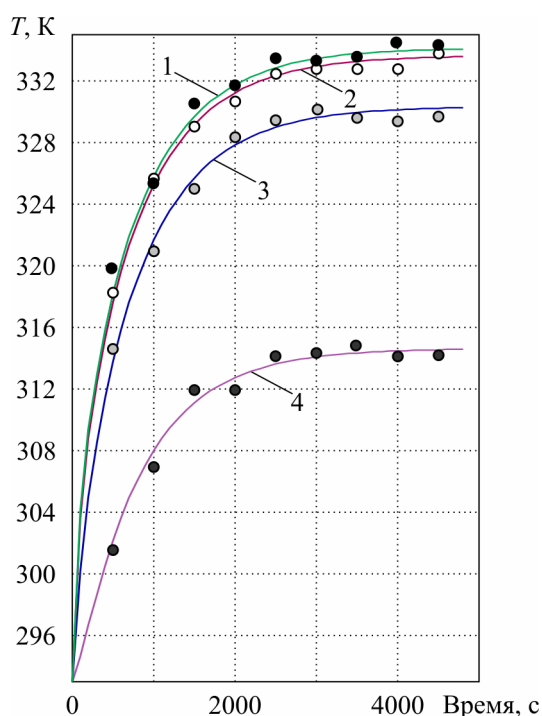


Рис. 8. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 100 Вт и токе питания ТЭБ 10 А.

- 1 – температура источника теплоты 1;
- 2 – температура источника теплоты 3;
- 3 – температура при $x = 125$ мм, $y = 47.5$ мм;
- 4 – температура при $x = 17$ мм, $y = 14$ мм.

Для анализа энергетических характеристик системы охлаждения на рис. 9 – 10 представлены изменения температуры контрольных точек имитатора электронной платы от силы электрического тока, питающего ТЭБ и потребляемой электрической энергии. В соответствии с полученными данными с увеличением силы тока, протекающего через ТЭБ, температура всех контрольных точек уменьшается. При этом ее наименьшее значение для данного случая при мощности источников тепла 120 Вт составляет 344 К, что соответствует току питания ТЭБ 9 А. Очевидно, что дальнейшее увеличение электрического тока вплоть до оптимального для данного типа ТЭМ значения (11.3 А), даст дальнейшее снижение температуры контрольных точек.

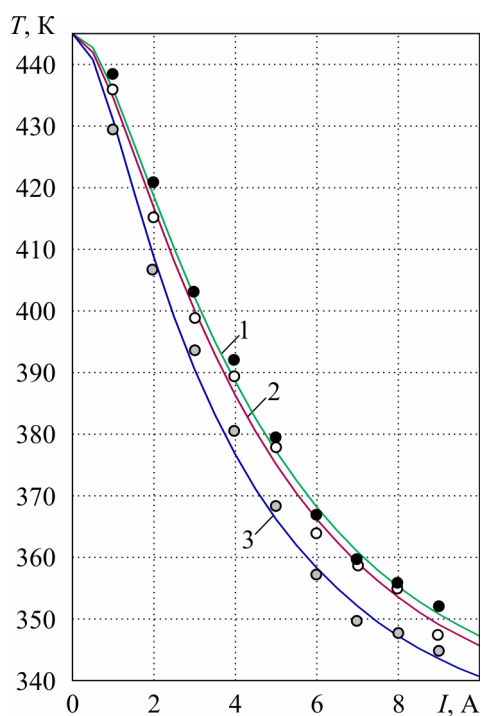


Рис. 9. Изменение температуры различных точек электронной платы от тока питания ТЭБ в стационарном режиме при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт.
1 – температура источника теплоты 1;
2 – температура источника теплоты 3;
3 – температура при $x = 125$ мм, $y = 47.5$ мм.

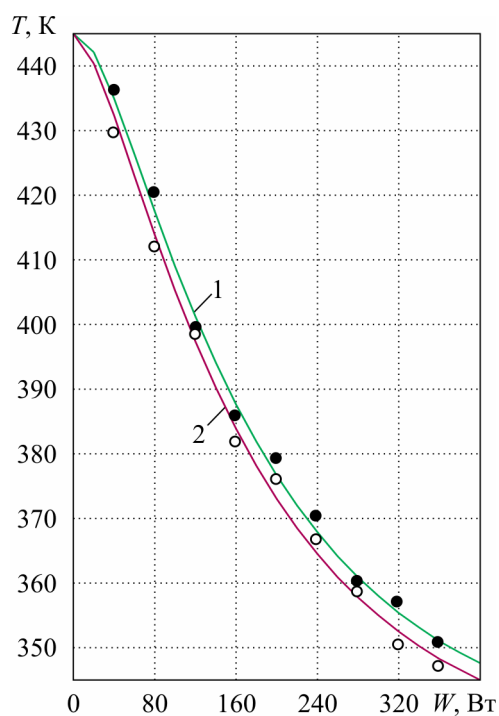


Рис. 10. Изменение температуры различных точек электронной платы от потребляемой ТЭБ мощности в стационарном режиме при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт.
1 – температура источника теплоты 1;
2 – температура источника теплоты 3.

В соответствии с ростом тока питания ТЭБ увеличивается потребляемая ею электрическая мощность. Для случая, представленного на рис. 10, току 9 А соответствует потребляемая мощность 360 Вт.

На рис. 11 приведены данные об изменении температуры контрольных точек имитатора электронной платы при отводе теплоты в рабочее вещество без использования ТЭБ. Согласно приведенным результатам подобное охлаждение не обеспечивает необходимый температурный режим элементов имитатора электронной платы. Так, температура тепловыделяющих элементов снижается лишь до значений 383 К и 385 К, что является недостаточным для обеспечения температурного режима их работы.

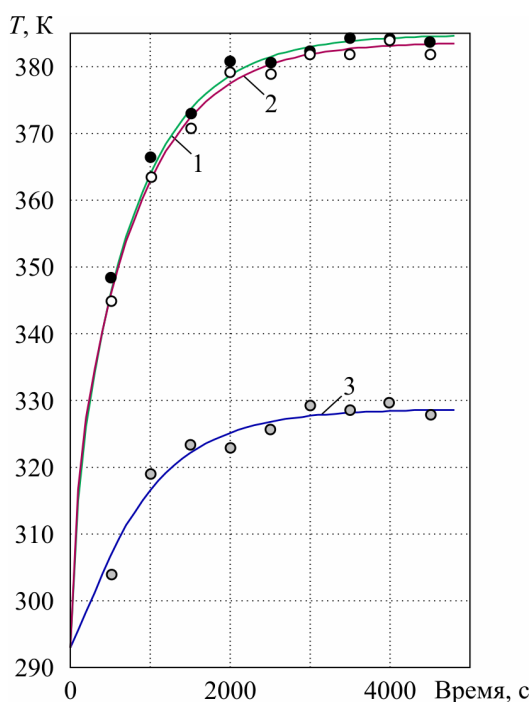


Рис. 11. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт и отводом теплоты в плавящееся рабочее вещество без ТЭБ.

1 – температура источника теплоты 1; 2 – температура источника теплоты 3;
 3 – температура при $x = 17$ мм, $y = 14$ мм.

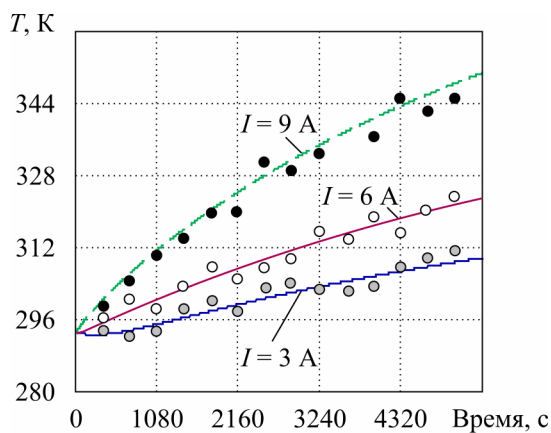


Рис. 12. Зависимость температуры оболочки емкости с рабочим веществом от времени при различных токах питания ТЭБ.

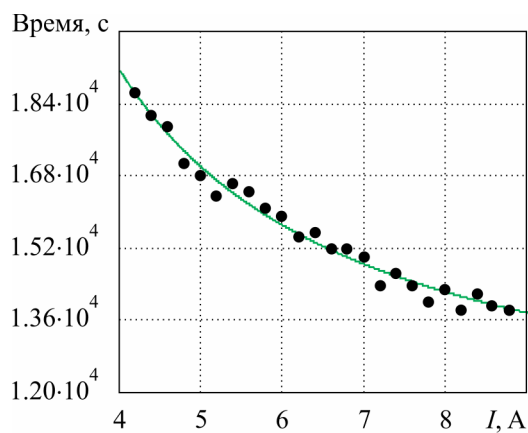


Рис. 13. Зависимость изменения времени полного проплавления рабочего вещества от тока питания ТЭБ.

На рис. 12 представлены экспериментальные зависимости температуры оболочки в зависимости от времени при плавлении рабочего вещества для различных значений тока питания ТЭБ. Согласно приведенным данным с ростом тока питания увеличивается количество теплоты, подводимого к поверхности емкости в единицу времени (тепловой мощности), что повышает температуру оболочки. Так, при использовании в качестве рабочего агента парафина увеличение тока питания ТЭБ с 3 до 9 А повышает температуру оболочки примерно на 40 К через 1.5 ч. Соответственно повышается и скорость плавления вещества. Согласно рис. 13, где приведены данные о продолжительности полного плавления веществ при различных значениях тока питания ТЭБ, увеличение электрического тока от 4 до 9 А снижает время полного плавления агентов с

5.1 ч. до 3.3 ч. На практике это может привести к тому, что при соответствующих тепловых нагрузках может нарушиться нормальный режим работы элементов электронной платы. Поэтому указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании охлаждающей системы.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для эффективного охлаждения элементов электронной платы ввиду неравномерного распределения теплового потока по ее площади целесообразным является применение соответствующего охлаждения, характеризующегося неравномерностью теплоотвода по площади электронной платы.
2. Указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным равномерным по энергетическим показателям; согласно проведенным экспериментальным исследованиям значение потребляемой мощности может быть снижено в 1.35 – 1.5 раза; кроме того, снижается количество используемых термоэлементов, масса радиатора, и соответственно масса всего охлаждающего устройства.
3. С увеличением мощности элементов РЭА, размещенных на электронной плате, растет мощность используемых для ее охлаждения ТЭБ, что сказывается на количестве применяемого рабочего вещества и требует учета при проектировании системы охлаждения.

Литература

1. <http://www.aavidthermalloy.com>
2. <http://www.ligra.narod.ru>
3. <http://www.eletex.ru>
4. http://www.heat_sink.com.tw
5. <http://www.alutronic.de>
6. <http://www.thermaflo.com>
7. <http://www.melcor.com>
8. <http://www.marlow.com>
9. <http://www.ferrotec.com>
10. http://www.fandis_tm.com
11. http://www.komatsu_electronics.co.jp
12. <http://www.kryotherm.ru>
13. <http://www.osterm.ru>
14. <http://www.rmtltd.ru>
15. <http://www.evercool.com.tw>
16. http://www.titan_cd.com
17. <http://www.zalman.co.kr>
18. <http://www.sunon.com.tw>
19. <http://www.thermaltake.com>
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Агаев М.У. Патент РФ №2365072, 2009, бюл. №23.
21. Исмаилов Т.А. Математическое моделирование системы неравномерного охлаждения электронных плат при совместном использовании плавящихся рабочих веществ и термоэлектрического метода преобразования энергии / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.У. Агаев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – № 6. – С. 51 – 58.

Поступила в редакцию 12.07.2013.