

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАТ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ¹

Аннотация.

Актуальность и цель. Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) основных элементов конструкций радиоэлектронных систем (РЭС) в условиях реальной эксплуатации является актуальной проблемой, решение которой позволяет на ранних этапах проектирования выявлять наиболее нагруженные элементы РЭС и принимать конструкторско-технологические решения для оптимизации проектируемых конструкций. Целью работы является повышение надежности и обеспечение требуемых тактико-технических характеристик изделий РЭС конструкторско-технологическими способами.

Материалы и методы. Рассмотрена математическая модель реальной платы РЭС с навесными элементами (излучающими тепло), находящейся под действием эксплуатационного теплового режима. Математическое моделирование теплового поля и НДС платы основано на применении метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS.

Результаты. Выполнено математическое моделирование и анализ тепловых полей и НДС платы при действии эксплуатационных внешних тепловых воздействий. Установлены наиболее нагруженные зоны платы, в которых могут развиваться дефекты механического происхождения, в том числе и латентные, в условиях эксплуатации РЭС. Предложены конструкторско-технологические методы по снижению термомеханических напряжений и повышению надежности конструкции.

Выводы. Предложенная модель позволяет исследовать НДС платы с учетом реального расположения и условий установки навесных элементов на ней. Путем математического моделирования установлены наиболее нагруженные зоны платы и ее элементов при эксплуатационных тепловых воздействиях.

Ключевые слова: платы, радиоэлектронные системы, тепловое воздействие, поле температур, напряженно-деформированное состояние.

A. N. Litvinov, O. Sh. Khadi, N. K. Yurkov

STUDY OF BOARD STATE IN RADIO ELECTRONIC SYSTEMS AT THERMAL IMPACTS

Abstract.

Background. Modeling of the stress-strain state (SSS) of the basic structural elements of electronic systems (RES) in conditions actual operation is an urgent problem, the solution of which allows at the early design stages to identify the most loaded elements of RES and to make design technological decisions to optimize the design. The aim of this work is to increase the reliability and to provide the required performance characteristics of RES products by a technological method.

¹ Статья подготовлена в рамках проектной части государственного задания на выполнение государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальные научные исследования, прикладные научные исследования и экспериментальные разработки) № 8.389.2014/К по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

Materials and methods. The authors considered a mathematical model of a real board of RES with hinged heat producing elements under the influence of the heat caused by the operating mode. Mathematical modeling of the thermal field and board's SSS was based on the finite element method (FEM), implemented in the ANSYS software package.

Results. The authors carried out mathematical modeling and analysis of thermal fields and SSS of boards under the action of external thermal impacts. The researchers established the board's most loaded areas, which are vulnerable to formation of defects of mechanical origin, including latent ones, in conditions of RES exploitation. The authors proposed design-technological methods to reduce stress and improve thermo mechanical reliability of the design.

Conclusions. The proposed model allows to investigate SSS of boards taking into account with the real location and installation conditions of attached components. Through mathematical modeling the authors established the most loaded areas on a board and its components under operational thermal impacts.

Key words: board electronic systems, thermal effect, temperature field, stress-strain state.

Введение

Современный уровень развития электронных технологий характеризуется тем, что, с одной стороны, растут мощности и увеличивается плотность размещения элементов, а с другой – снижается стойкость электрорадиоэлементов (ЭРЭ) к тепловым и механическим воздействиям. Все сложнее обеспечить требуемые температурный и вибрационный режимы для стабильной работы радиоэлектронных систем (РЭС) на основе традиционных методов.

Одной из важнейших задач развития научных основ конструирования и технологии изготовления блоков и изделий современных РЭС и различных приборных устройств является создание адекватных прикладных моделей, описывающих состояние конструкций и отдельных элементов в процессе их производства, испытаний и эксплуатации [1].

Системный анализ различных конструкций РЭС и приборных устройств показывает, что большинство изделий, блоков и их элементов являются гетерогенными структурами, подверженными внешним воздействиям. За счет изменения их напряженно-деформированного состояния (НДС) происходит изменение основных электропараметров устройств, ухудшение метрологических характеристик, снижение их надежности, а в ряде случаев их частичный или полный отказ в результате разрушения отдельных элементов. При этом основными являются динамические и температурные воздействия, возникающие в ходе выполнения различных технологических операций в производстве, при испытаниях и в процессе эксплуатации изделий в широком диапазоне тепловых и вибрационных нагрузок [1, 2].

В процессе технологического проектирования требуется полный анализ технологических факторов, определяющих качество конечного продукта. Отметим, что основным источником отказов РЭС являются печатные платы, которые служат основой в большинстве современных электронных систем. Технологические аспекты повышения качества печатных плат находятся на острие современных теоретических и научно-практических исследований.

Анализ технологических процессов показывает, что существующие модели [3] не в полной мере учитывают явления и процессы, происходящие

в гетерогенных структурах изделий, и нуждаются в уточнении и совершенствовании [4].

1. Модель для исследования

Существующие модели для исследования полей термомеханических напряжений в гетерогенной структуре платы, как правило, не учитывают ряда конструктивных особенностей исследуемой платы: наличие электрорадиоэлементов на ее поверхности, способы их крепления к плате, наличие дополнительных клеевых или паяных швов между основаниями ЭРЭ и поверхностью платы, разогрев отдельных участков платы за счет мощностей, выделяемых некоторыми ЭРЭ и т.д. [3].

Существующие аналитические методы расчета часто приводят к достаточно грубым оценкам тепловых полей и термомеханических напряжений, возникающих в платах, а в ряде случаев могут приводить к ошибочным результатам и выводам.

Рассмотрим реальную плату блока РЭС, представленную на рис. 1. На поверхности прямоугольной платы с размерами ($a \times b$) в плане и толщиной h расположены ЭРЭ, имеющие различные размеры и массы. На рис. 1 все элементы и координаты их расположения показаны в масштабе. Плата крепится к корпусу блока в пяти точках винтами М6 (четыре угловых и пятая точка расположена вблизи центра платы). Плата отнесена к системе координат x, y, z .

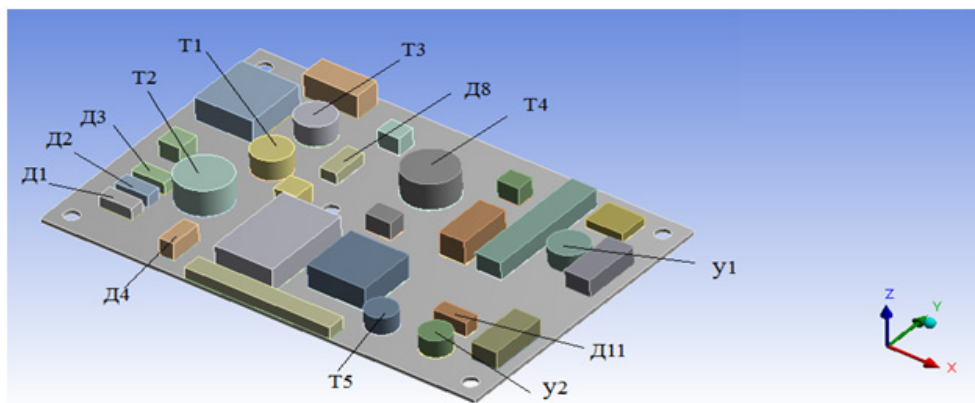


Рис. 1. Плата с элементами

В табл. 1 приведены мощности, выделяемые активными ЭРЭ в рабочем режиме блока.

Таблица 1

Мощности, выделяемые на активных элементах

Обозначение активного элемента	T ₁	T ₂ , T ₄	T ₃ , T ₅	Y ₁ , Y ₂	Д ₁ - Д ₄	Д ₈	Д ₁₁
Выделяемая мощность, Вт	0,2	1,1	0,1	0,08	0,06	0,077	0,052

Рассматривается несколько моделей:

I – элементы моделируются в виде точечных источников тепла;

II – элементы жестко закреплены на плате, т.е. припаяны (приклеены) к поверхности платы.

Задача по определению поля температур на плате решается методом конечных элементов (МКЭ) с использованием процедуры автоматического разбиения платы на конечные элементы. Так как плата является статически неопределимой системой, то любое изменение температуры на ее поверхности приводит к деформированию, которое сопровождается изгибом платы. Напряженно-деформированное состояние платы характеризуется интенсивностью деформаций ϵ_i , прогибами W и эквивалентными напряжениями $\sigma_{\text{эКВ}}$, которые определяем в соответствии с энергетическим критерием Мизеса [5, 6]:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

В табл. 2 представлены численные результаты математического моделирования теплового поля на поверхности платы для двух моделей, а также указаны расчетные значения температур. При расчете приняты следующие исходные данные: материал платы – стеклотекстолит; $(a \times b) = (120 \times 80)$ мм², $h = 1,5$ мм; температура окружающей среды $T_0 = 22$ °С. Во второй модели считается, что элементы припаяны к плате припоем ПОС61 с толщиной шва $h_{\text{ш}} = 0,1$ мм.

Таблица 2

Значения температур на поверхности платы

Активный элемент	Температура T , °С										
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	Y_1	Y_2	D_1, D_2, D_3	D_4	D_8	D_{11}
Модель I	24,2	28,4	23,1	27,6	22,9	22,0	22,8	22,6	23,2	22,7	22,7
Модель II	23,8	28,4	22,9	28,4	23,2	22,6	23,2	22,7	23,0	22,7	22,7

Плата находится в рабочем режиме в соответствии с данными табл. 1, температуры указаны в точках расположения активных элементов.

Анализ результатов расчета по первой и второй моделям показал, что выбор модели несущественно влияет на распределение температур по поверхности платы в рабочем режиме активных элементов. В то же время математическое моделирование НДС платы показало, что при полученном распределении температур полный анализ НДС возможен только при использовании второй модели, которая учитывает существенное изменение жесткости платы за счет ее связи с элементами. При этом на поверхности платы термомеханические напряжения не превышают 0,3 МПа. Наиболее нагруженными оказываются паяные швы под активным элементом T_2 , где $\sigma_{\text{эКВ}} = 0,9$ МПа.

2. Моделирование состояние платы при тепловых воздействиях

Рассмотрим состояние платы, представленной на рис. 1, при ее эксплуатации. В соответствии с техническими условиями она эксплуатируется в диапазоне температур от -60 до $+125$ °С. По-прежнему рассматриваем две

модели. Моделирование НДС платы выполнено МКЭ, реализованном в пакете ANSYS.

На рис. 2 и 3 представлены НДС платы с элементами при действии температуры $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Плата находится в рабочем состоянии, т.е. активные элементы выделяют мощность в соответствии с данными табл. 1. На флажках показаны значения W и $\sigma_{\text{экв}}$ в некоторых точках платы.

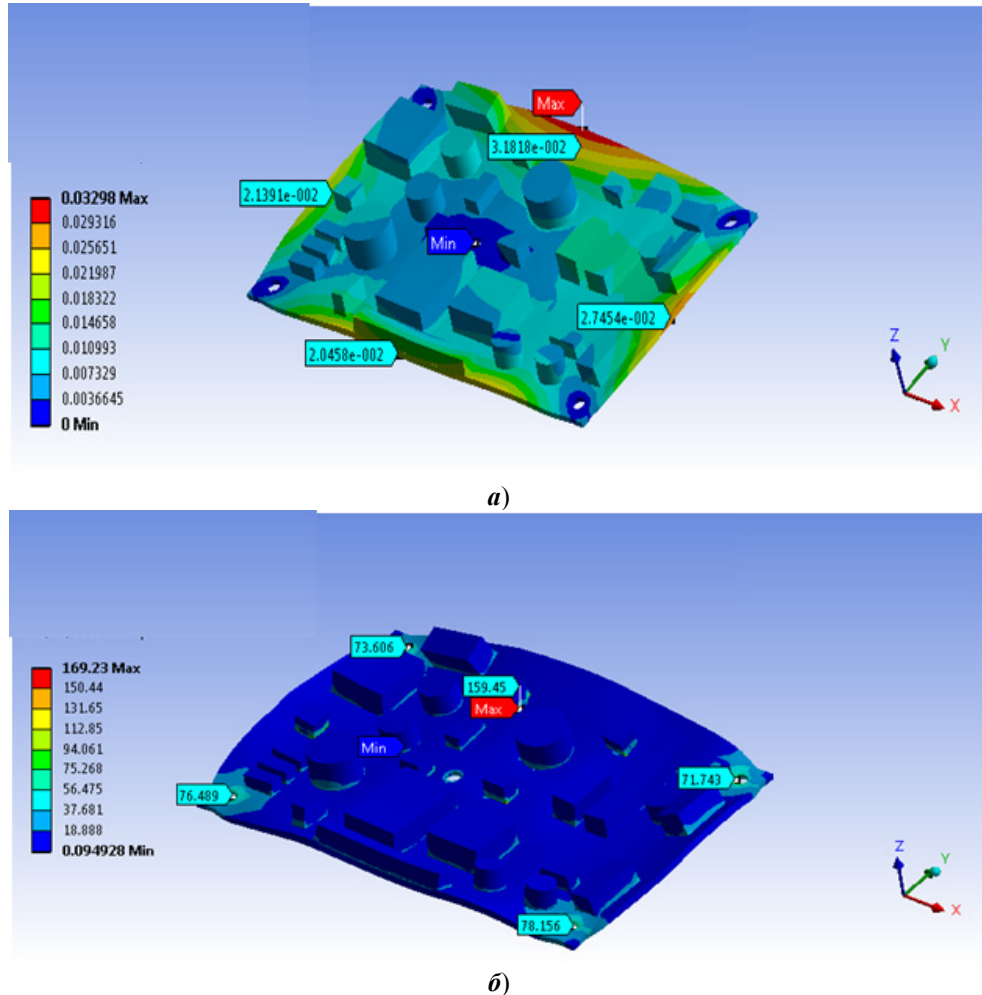


Рис. 2. НДС платы при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$:

a – распределение прогибов платы W ; *б* – распределение напряжений $\sigma_{\text{экв}}$

Из анализа полученных результатов следует, что при тепловом эксплуатационном воздействии происходит деформация платы, сопровождающаяся ее изгибом. При этом для рассматриваемой конструкции максимальные прогибы составляют: $\max W = 0,0318\text{ мм}$ при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\max W = 0,0234\text{ мм}$ при действии температуры $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, *a* и 3, *a*).

Анализ поля эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (рис. 2, *б* и 3, *б*) показывает, что наиболее нагруженные зоны при тепловом воздействии расположены

в зоне элемента T_4 (см. рис. 1) и в зонах угловых отверстий, выполненных в плате для ее крепления к блоку.

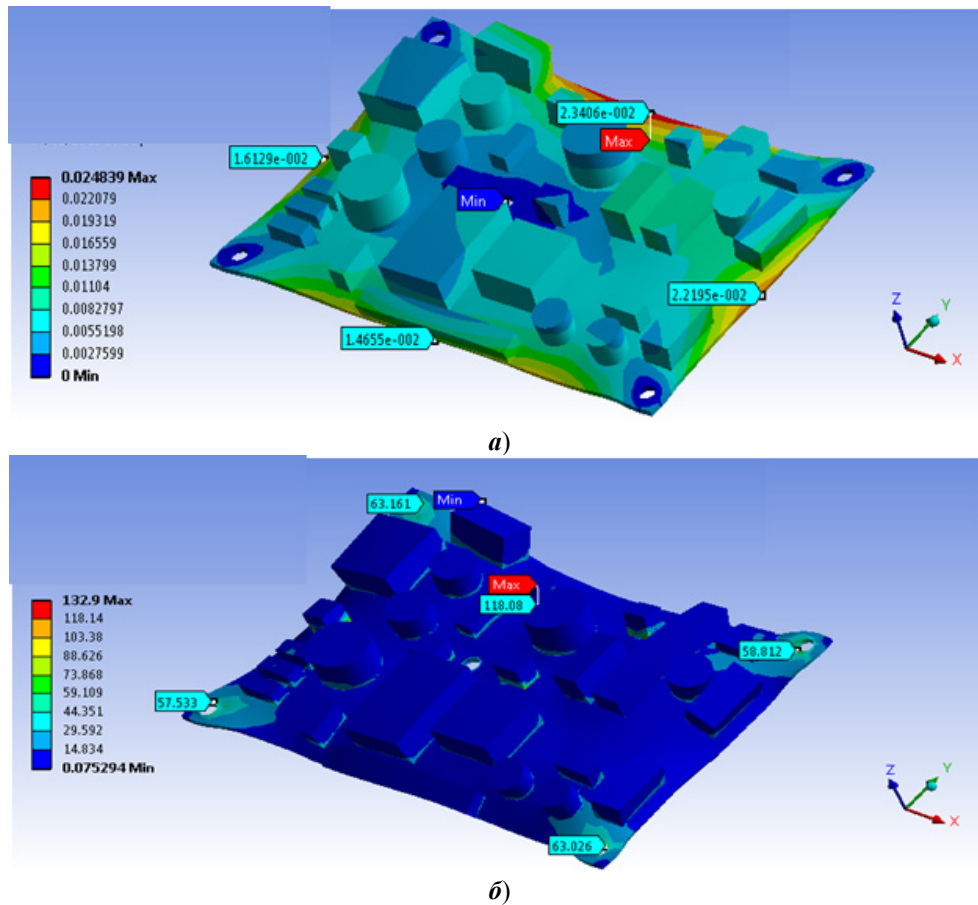


Рис. 3. НДС платы при $T = -60^\circ\text{C}$:

a – распределение прогибов платы W ; *б* – распределение напряжений $\sigma_{\text{экв}}$

Максимальные напряжения в зоне элемента T_4 возникают в паяном шве и составляют $\max \sigma_{\text{экв}} = 159,45$ МПа при $T = 125^\circ\text{C}$ и $\max \sigma_{\text{экв}} = 118,08$ МПа при $T = -60^\circ\text{C}$. В зоне угловых отверстий $\max \sigma_{\text{экв}} = 78,15$ МПа и 63,16 МПа при $T = 125^\circ\text{C}$ и $T = -60^\circ\text{C}$ соответственно.

Для припоя ПОС 61 предел прочности составляет [7] $\sigma_b = 47$ МПа, а для материала платы $\sigma_b = 350$ МПа. Наличие больших напряжений в указанных зонах может приводить к возникновению пластических деформаций в паяных швах и образованию микротрещин в зоне отверстий под крепежные винты, а также к развитию латентных дефектов в виде скрытых непропоев, микротрещин и иных дефектов, которые могут развиваться в наиболее нагруженных зонах при дополнительном вибрационном воздействии в процессе эксплуатации.

На рис. 4 и 5 представлены НДС платы при тепловом воздействии в соответствии с первой моделью, которая не учитывает изменение жесткости платы за счет ЭРЭ, расположенных на ее поверхности.

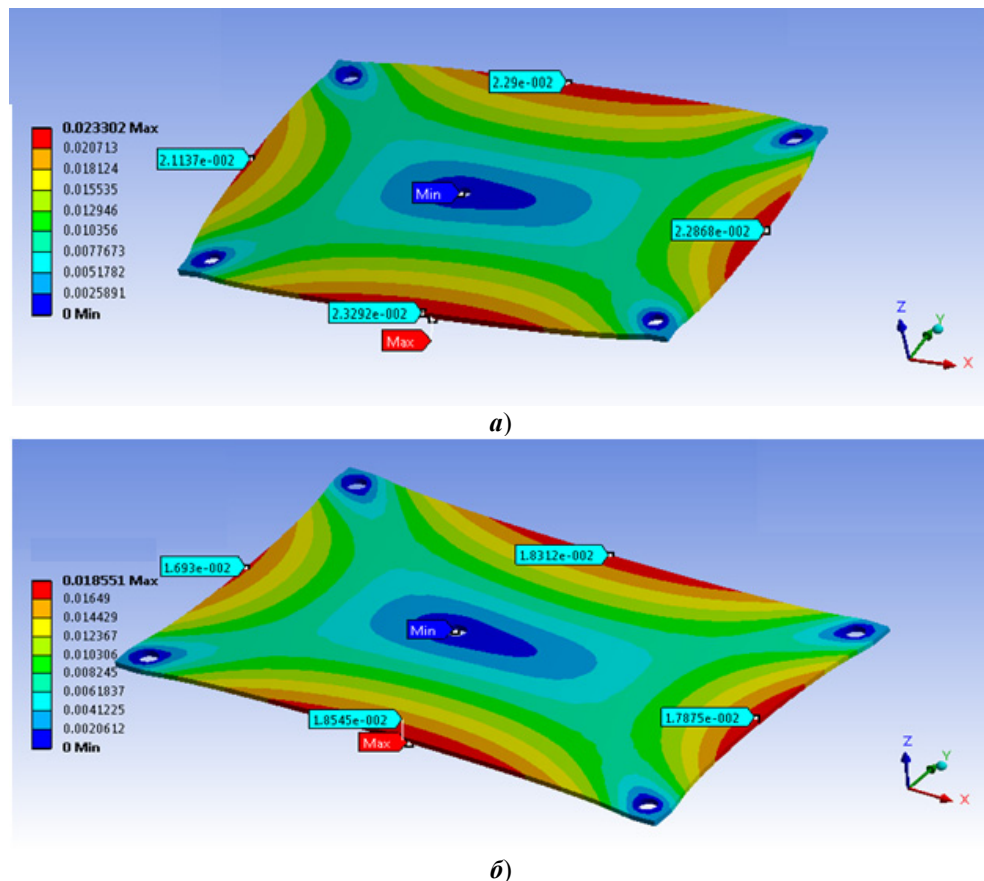


Рис. 4. Распределение W по плате: *а* – при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – при $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ представленных результатов моделирования показывает, что применение первой модели при тепловом воздействии существенно искажает НДС исследуемой платы. Моделирование НДС при тепловом воздействии для различного расположения ЭРЭ на ее поверхности показало, что расположение ЭРЭ существенно влияет на НДС платы и величины эквивалентных напряжений.

Заключение

Моделирование НДС для плат различных типоразмеров при любых способах их закрепления в блоках РЭС показывает, что при тепловых воздействиях происходит коробление платы, сопровождающееся ее изгибом.

Установлено, что для адекватного моделирования и анализа НДС плат при тепловых нагрузках рекомендуется применять вторую модель, основанную на МКЭ, реализованную в программном комплексе ANSYS и учитывающую реальное расположение и крепление ЭРЭ к плате. Эта модель позволяет определять наиболее нагруженные зоны, в которых возможно образование и развитие дефектов, в том числе и латентных.

Применение математического моделирования НДС конструктивных элементов блоков РЭС и других приборных устройств на основе рассмотренной модели позволяет на ранних этапах проектирования за счет конструктор-

ско-технологических решений создавать блоки с повышенной термостабильностью и надежностью в требуемом эксплуатационном режиме внешних воздействий.

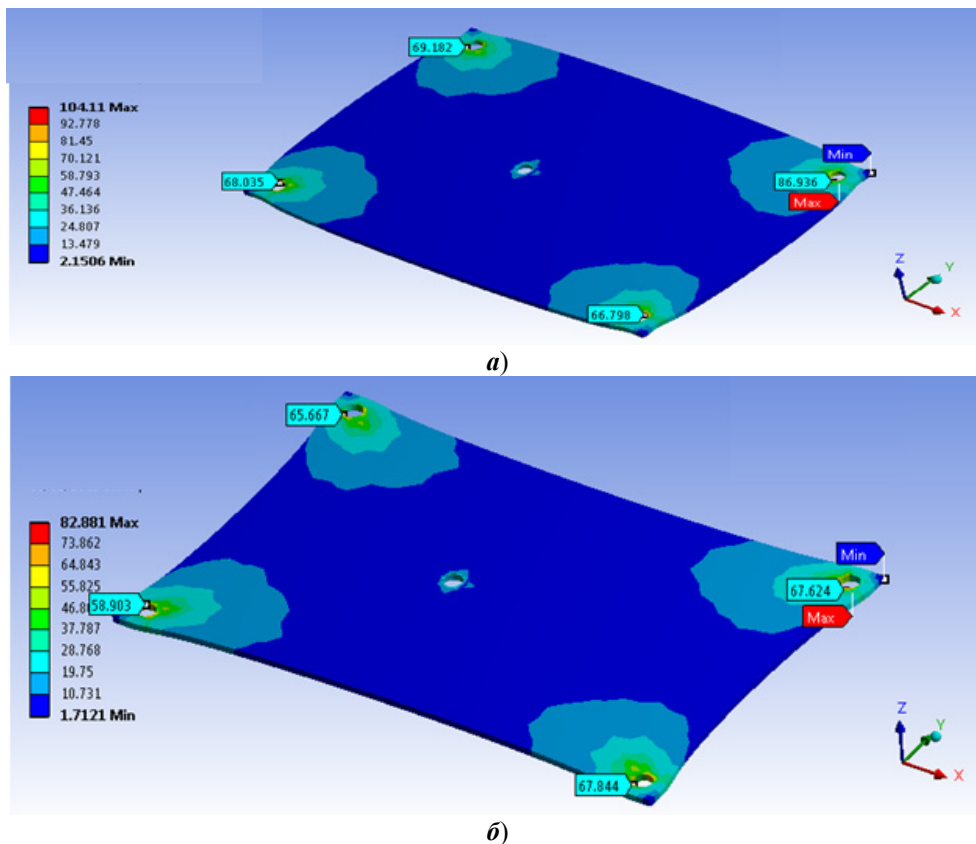


Рис. 5. Распределение $\sigma_{\text{эВ}}$ по плате: *a* – при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – при $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Представленные разработки и исследования проведены в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме «Информационные технологии анализа конструкций РЭС при воздействии внешних факторов» (№ 8.389.2014/к) и «Создание методологических основ обнаружения и локализации латентных технологических дефектов бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов методами неразрушающего контроля и диагностики на этапах производства (ГК № 14.514.11.4078 от 10.03.2013).

С точки зрения дальнейших разработок перспективными следует считать исследование и разработку моделей, позволяющих исследовать НДС элементов РЭС при воздействии тепловых ударов, гармонической и случайной вибраций, линейных и ударных внешних воздействий, а также их совместного воздействия на проектируемые элементы и блоки РЭС в соответствии с требованиями, предъявляемыми к надежности и тактико-техническим характеристикам изделий.

Список литературы

1. **Юрков, Н. К.** Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – СПб. : Лань, 2014. – 480 с.

2. **Хади, О. Ш.** Моделирование состояния гетерогенных структур технических систем для повышения безопасности в процессе их жизненного цикла / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // *Фундаментальные проблемы системной безопасности*. – Елец, Изд-во ЕГУ, 2014. С. 68–75.
3. **Литвинов, А. Н.** Прикладные модели механики гетерогенных структур изделий приборостроения : моногр. / А. Н. Литвинов, М. А. Литвинов, В. В. Смогунов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – 320 с.
4. **Литвинов, А. Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния слоистых структур РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, О. Ш. Хади, Н. К. Юрков // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 4 (32). – С. 146–157.
5. **Хади, О. Ш.** Моделирование состояния гетерогенных структур для повышения безопасности в процессе жизненного цикла сложных технических систем / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2014. – № 3 (7). – С. 8–15.
6. **Безухов, Н. Н.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. Н. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.
7. **Кузнецов, О. А.** Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов, В. С. Сергеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 144 с.

References

1. Yurkov N. K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv: uchebnik* [Technology of electronic devices production: textbook]. Saint-Petersburg: Lan', 2014, 480 p.
2. Khadi O. Sh., Litvinov A. N. *Fundamental'nye problemy sistemnoy bezopasnosti* [Fundamental problems of system security]. Elets, Izd-vo EGU, 2014, pp. 68–75.
3. Litvinov A. N., Litvinov M. A., Smogunov V. V. *Prikladnye modeli mekhaniki geterogennykh struktur izdeliy priborostroeniya: monogr.* [Applied models of heterogeneous structure mechanics of instrument engineering products: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2009, 320 p.
4. Litvinov A. N., Khadi O. Sh., Yurkov N. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 4 (32), pp. 146–157.
5. Khadi O. Sh., Litvinov A. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 3 (7), pp. 8–15.
6. Bezukhov N. N. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Basic theory of elasticity, plasticity and creeping]. Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 512 p.
7. Kuznetsov O. A., Pogalov A. I., Sergeev V. S. *Prochnost' elementov mikroelektronnoy apparatury* [Strength of microelectronic equipment elements]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 144 p.

Литвинов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: litvinov@pnzgu.ru

Litvinov Aleksandr Nikolaevich
Doctor of engineering science, professor,
sub-department of theoretical and applied
mechanics and graphics, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Хади Одей Шакер

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: aodayshaker@mail.ru

Khadi Odey Shaker

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_nk@mail.ru.

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.396.6.001:004.4.

Литвинов, А. Н.

Исследование состояния плат радиоэлектронных систем при тепловых воздействиях / А. Н. Литвинов, О. Ш. Хади, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2 (34). – С. 182–191.