

УДК 621.396.6

Комплексное решение задач оптимизации проектирования космических приборов нового поколения

Н. В. Карутин¹, В. А. Шипова², А. И. Мацыгорин

^{1,2}к. т. н.

ОАО «Российские космические системы»

e-mail: bg172@mail.ru

Аннотация. Одни из наиболее ответственных вопросов при создании космических приборов нового поколения — обеспечение минимизация ошибок при проектировании и прогнозирование работы приборов в условиях штатной эксплуатации в части внешних воздействующих механических факторов и тепловых режимов. Повышение качества проектирования приборов обеспечивается детальным компьютерным моделированием их прочностных и тепловых режимов на всех этапах разработки аппаратуры и в процессе их изготовления при осуществлении сопровождения конструкторских работ на стадии регулировки и конструкторско-доводочных испытаний.

Ключевые слова: конструкция, прибор, численное моделирование, прочность, температура, тепловой режим

Complex Solution During Optimization Designing the Space Devices of New Generation

N. V. Karutin¹, V. A. Shipova², A. I. Matsygorin

^{1,2}candidate of engineering science

Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: bg172@mail.ru

Abstract. One of the crucial moments at creation of new space devices of new generation is the securing of the diminishing miscalculations for devices design in the securing of the most favorable conditions mechanical and thermal modes for forecasting their normal operation. The quality of devices design is provided by means of detailed computer simulation mechanical and thermal modes of the devices on all steps of design devices, at the stages of productions, adjustment and developmental testing of these devices.

Key words: construction, device, digital modeling, robustness, temperature, thermal regime

Одни из наиболее важных вопросов при создании космических приборов нового поколения, имеющих тенденцию к усложнению конструкций и объединению в моноблоки нескольких приборов, обеспечивающих значительный срок активного существования, — минимизация ошибок при проектировании и прогнозирование работы в условиях штатной эксплуатации в части внешних воздействующих механических факторов и тепловых режимов.

С целью оптимизации конструкций приборов и сокращения времени их проектирования необходимо:

- осуществлять численное моделирование прочностных и тепловых режимов приборов на всех этапах разработки аппаратуры последовательно, начиная с разработки печатных плат, переходя к приборам, модульным блокам и системам, осуществляя при этом экспертное сопровождение конструкторских работ;

- проводить контроль динамических и температурных характеристик приборов на стадиях ЛОИ и КОИ, что позволит при необходимости уточнить прочностные и тепловые расчеты, устранить возможные недочеты как в конструкции, так и при изготовлении приборов, и сократить объем натуральных испытаний.

С целью обеспечения благоприятных тепловых режимов аппаратуры, работающей в открытом космосе, были проведены расчеты температурных режимов приборов, входящих в состав различных изделий: «Глонасс-К2» и других.

Математическое моделирование тепловых и прочностных режимов

Использование численного моделирования поведения приборов при воздействии механических нагрузок позволяет повысить надежность выпускаемой аппаратуры, избежать значительных ошибок на стадии проектирования и сократить объем наземных отработочных испытаний. Расчеты механической прочности приборов позволяют определить запасы безопасности, перемещения и напряжения в условиях статической нагрузки, а также собственные частоты и формы колебаний, отклик

конструкции на гармонические составляющие возмущающей нагрузки, отклик конструкции на действие произвольной нагрузки как функции времени (ударные воздействия), вычисление напряжений и деформаций при воздействии случайной широкополосной вибрации. Таким образом, математическое моделирование позволяет имитировать такие нагрузки, которые нецелесообразно или даже невозможно осуществить экспериментально.

Расчет напряженно-деформированного состояния проводится при помощи конечно-элементного метода. Качество конечно-элементной модели (КЭМ), то есть степень ее приближения к реальной физической модели, определяется в том числе и степенью «дробления», то есть количеством элементарных объемов (ячеек) и узлов, на которые разбивается модель, и связей между ними. Количество ячеек может варьироваться в весьма широких пределах от тысяч до нескольких миллионов. Последний случай потребует весьма больших вычислительных мощностей. Таким образом, степень приближения расчетной модели к реально существующей определяется главным образом балансом между имеющимися вычислительными мощностями и качеством КЭМ.

Приборы, входящие в состав изделий, различны по своему функциональному назначению, конструкции и рассеиваемой тепловой мощности и располагаются как в герметичных, так и в негерметичных отсеках, тепло от которых отводится теплопроводностью на плиту, с постоянной температурой или конвекцией к заполняющему гермоотсек газу, или излучением от приборов непосредственно в окружающее пространство.

Существуют три вида теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и теплообмен излучением.

Совокупность двух или трех видов теплообмена называют сложным теплообменом. Численное решение стационарных и нестационарных задач сложного теплообмена представляет собой трудную задачу, для решения которой в последние годы широко используется математическое моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов.

Прибор можно рассматривать как совокупность корпуса и плат, основные элементы кон-

струкции прибора, как правило, выполнены из следующих материалов:

- стенки корпуса прибора — алюминиевый сплав АМг6, Д16 или АМц;
- платы стеклотекстолитовые с двухсторонней медной металлизацией, причем процент металлизации платы определяет приведенное значение коэффициента теплопроводности, $\lambda = (3,5-17,8)$ Вт/мК;
- платы поликоровые, припаянные к основанию из титанового сплава ВТ1 или ОТ4, $\lambda = (13-17,75)$ Вт/мК;
- платы трехслойные стеклотекстолитовые с четырьмя тонкими слоями меди, $\lambda = (17,5-18,7)$ Вт/мК;
- платы блока питания стеклотекстолит с медью на подложке из алюминиевого сплава, $\lambda = 78,7$ Вт/мК.

Конструктивно при установке платы в корпусе прибора должен быть предусмотрен необходимый, в соответствии с тепловой нагрузкой, контакт платы с корпусом, который и обеспечивает отвод тепла от ЭРИ.

Математическое моделирование позволяет с достаточной степенью точности решать задачи сложного теплообмена, однако здесь на первое место выходит корректность задания всех граничных и конструктивных особенностей изделия. Тесное сотрудничество разработчиков и конструкторов с теплофизиками позволяет повысить эффективность проектирования приборов нового поколения.

Сопоставление результатов температурных и прочностных расчетов

По своему функциональному назначению можно выделить следующие основные виды приборов: передатчики высоковольтные (ПРД ЛБВ), передатчики транзисторные (ПРД), приемо-передающее устройство (ППУ), высокочастотные приемники (ВЧ ПРМ), высокочастотные формирователи ответного сигнала (ФОС), предварительные

усилители мощности (ПУМ) и бортовую аппаратуру командно-программных систем (БА КИС).

Рассмотрим на примерах особенности температурных и прочностных режимов приборов.

Тепловой расчет ППУ выявил наличие повышенной температуры на корпусе микросхемы ЦПРМ-ГК, в результате чего была проведена доработка корпуса прибора и введена дополнительная стойка под микросхемой, что позволило снизить температуру; максимальное приращение температуры на корпусе микросхемы ЦПРМ-ГК составляет $\Delta t_1 = 13,3^\circ\text{C}$. Результаты расчета стационарного температурного состояния ППУ приведены на рис. 1.

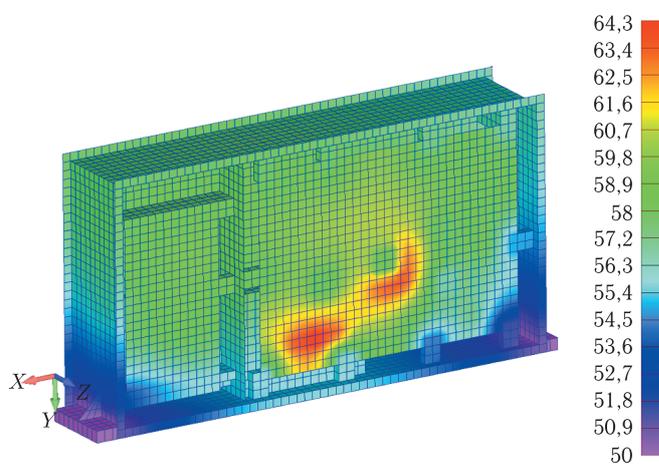


Рис. 1. Стационарное температурное состояние платы прибора ППУ

Средняя плотность теплового потока на основании прибора в случае контакта с панелью четырьмя крепежными винтами составляет $q_1 = 0,32$ Вт/см², при этом наибольшая температура ЭРИ на плате ФЧ $+59,2^\circ\text{C}$, на плате ЦПРМ-ГК $+63,3^\circ\text{C}$, а для генератора $+60,8^\circ\text{C}$.

Продуманное конструктивное решение обеспечило благоприятный температурный режим всего прибора в целом — на всех платах прибора расчетные температуры существенно меньше максимально предельно допустимых значений и лежат в интервале от $+45^\circ\text{C}$ до $+54^\circ\text{C}$.

Результаты расчета температурного состояния бортового радиопередающего устройства (РПДУ) МРЛ в нестационарном режиме с циклом длительностью 20 с со следующей периодичностью:

«излучение» — 5 с, «молчание» — 15 с, за период в 1524 с и далее с выходом на квазистационарный режим с мощностью тепловыделения $0,25Q_{\text{рас}}$ и продолжительностью до 2000 с и до 3000 с (рис. 2). На рис. 3 представлены графики изменения температурного состояния приборов, входящих в аппаратуру РПДУ МРЛ: модуля YMS1_1 — (зеленая линия); ИВЭП_1 (синяя линия), сумматора (красная линия) и переключателя (оранжевая линия), в импульсном режиме за 1524 с с переходом в квазистационарный режим продолжительностью до 3000 с, за который система выходит на стационарный режим.

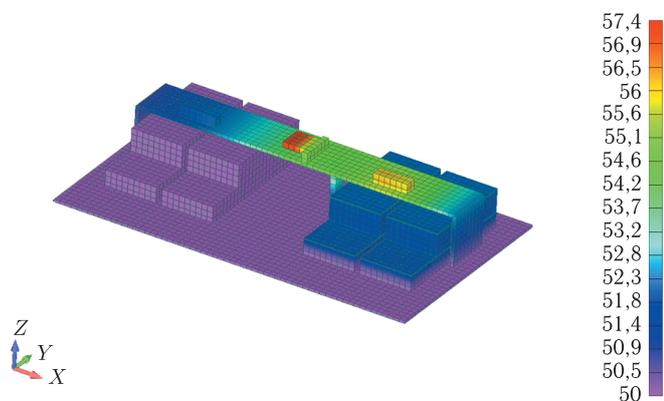


Рис. 2. Температурное состояние аппаратуры РПДУ МРЛ в импульсном режиме: 5 с «излучение» и 15 с «молчание» после 1524 с работы

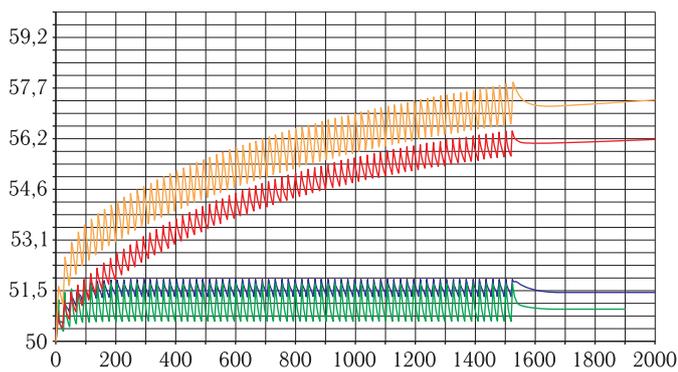


Рис. 3. Температурное состояние аппаратуры РПДУ МРЛ в импульсном режиме: 5 с «излучение» и 15 с «молчание» после 1524 с работы

Результаты расчетов температурных режимов показали, что при увеличении размеров (ширины и толщины) кронштейна радиопередающего

устройства РПДУ МРЛ при заданной равномерно температуре плиты-основания $+50^{\circ}\text{C}$ наибольшее значение температуры в импульсном режиме устанавливается на корпусе переключателя $t_1 = +58,0^{\circ}\text{C}$ и сумматора $t_2 = +56,4^{\circ}\text{C}$ в конце цикла «излучения» (1524 с), а для квазистационарного режима с одной четвертью от нагрузки за 3000 с на переключателе $t_1 = +57,7^{\circ}\text{C}$ и сумматоре S1-1 $t_2 = +56,4^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Результаты прочностного расчета блока усилителей мощности БУМ представлены на рис. 4–6. Конструкция прибора была доработана: изменена конструкция кронштейна, что позволило снизить напряжения в материале конструкции прибора.

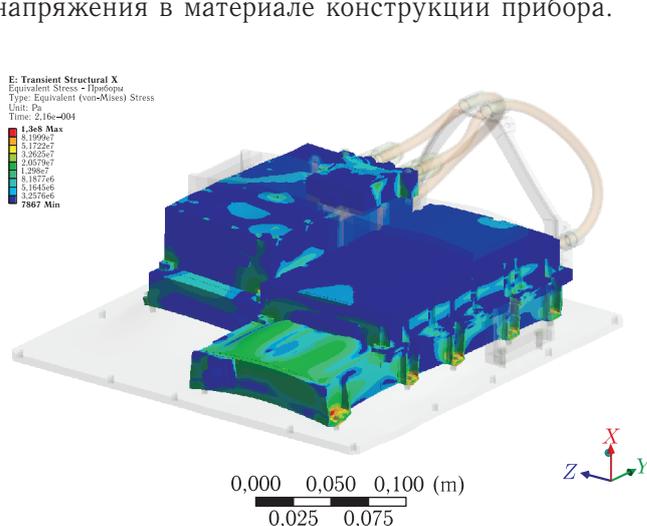


Рис. 4. Распределение напряжений в элементах прибора РПДУ при воздействии гармонической вибрации на р. ч. 797 Гц

По результатам тепловых расчетов блок усилителей мощности БУМ, расположенный на плите-основании, устанавливается на несущей панели с жидкостной системой охлаждения, причем наиболее теплонагруженные составляющие БУМ расположены над трубами змеевика системы жидкостного охлаждения, что обеспечило равномерное распределение температуры на посадочном месте составных частей БУМ (рис. 7).

Расчет стационарного температурного состояния моноблока КТМ для трех режимов холодного резервирования модулей: ВИП, ВИП2_1–ВИП2_3, ТМ1–ТМ3, КУ_1, КУ_2, КУ1 и кросс-платы выявил, что, несмотря на значительную

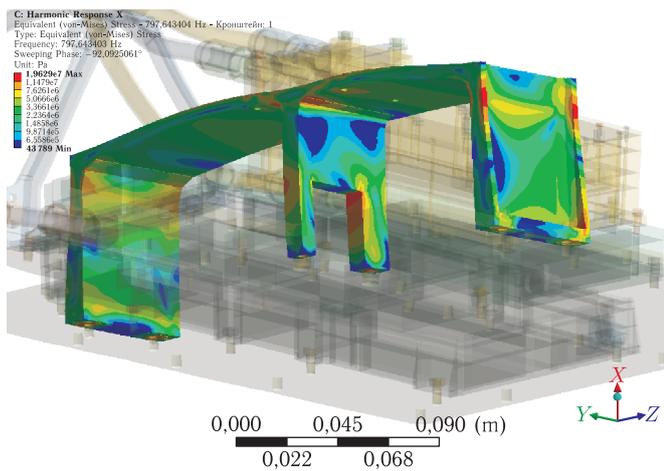


Рис. 5. НДС РДПУ прибора при воздействии ударного импульса $3500g$, $\tau = 0,2$ мс

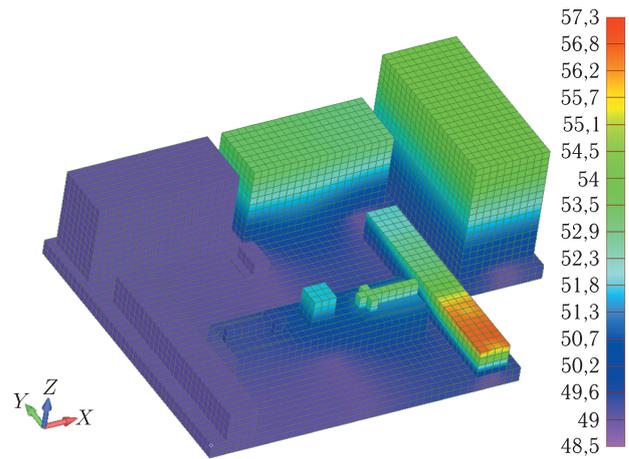


Рис. 7. Стационарное температурное состояние блока усилителей мощности БУМ, установленного на несущей панели

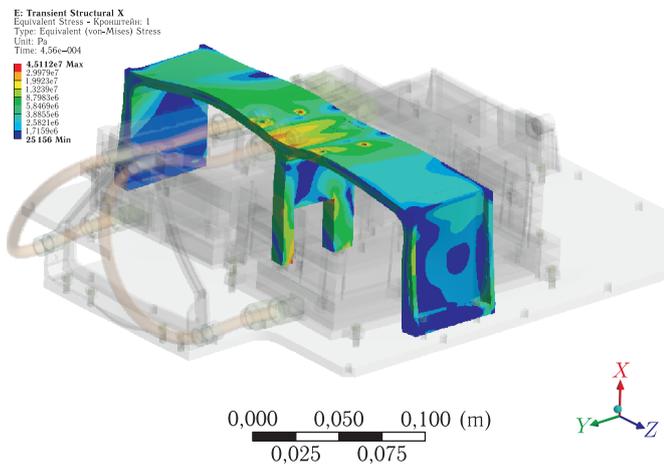


Рис. 6. НДС РДПУ прибора при воздействии ударного импульса $3500g$, $\tau = 0,2$ мс

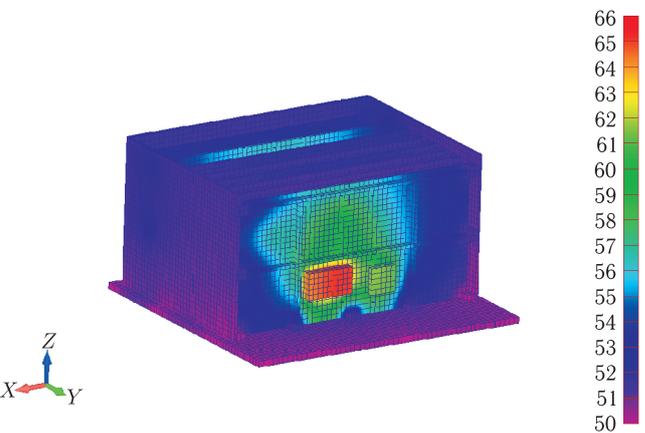


Рис. 8. Температурное состояние модуля КУ_2 прибора КТМ

мощность тепловыделения прибора $Q = 21,3$ Вт, расчетные температуры ЭРИ плат А1–А12 ниже допустимых техническими условиями значений температур на соответствующие узлы, при этом наибольшее значение температуры имеют микросхемы плат А3–А5 модулей КУ1, КУ_1 и КУ_2, которое составляет $+65,5^\circ\text{C}$ (рис. 8).

Расчет стационарного температурного состояния прибора ФМРС МРЛ выявил, что для обеспечения благоприятного теплового режима эксплуатации блоков ФЦС-SD и входящих в него ЭРИ необходимо обеспечить дополнительный отвод тепла от ряда микросхем. После конструктивных доработок расчетные температуры прибора ФМРС

МРЛ стали ниже допустимых техническими условиями значений температур на соответствующие узлы и ЭРИ, плата ФЦС-SA $t = +59,6^\circ\text{C}$ (рис. 9).

Температурный режим усилителя мощности УМ при температуре штатной панели $+50^\circ\text{C}$ и работающем втором канале представлен на рис. 10. Из результатов следует, что температура работающих СВЧ-транзисторов трех каналов имеет значение $+73,2^\circ\text{C}$, $+74,3^\circ\text{C}$, $+72,5^\circ\text{C}$ соответственно, при предельно допустимых значениях температуры ЭРИ $+95^\circ\text{C}$, что указало на необходимость конструкторской доработки. Для улучшения температурного режима СВЧ-транзисторов было рекомендовано изготовить их основание и направляющую

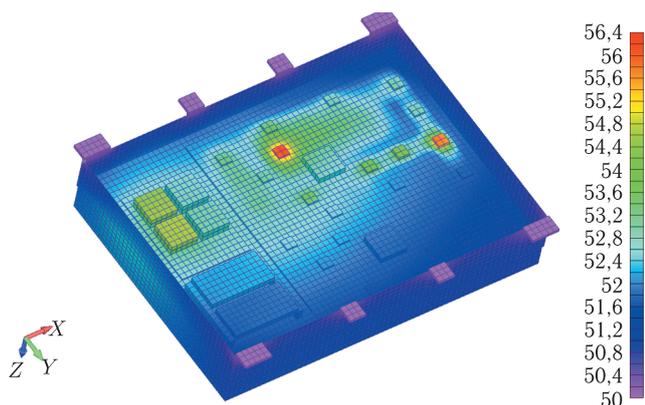


Рис. 9. Стационарное температурное состояние прибора ФМРС МРЛ

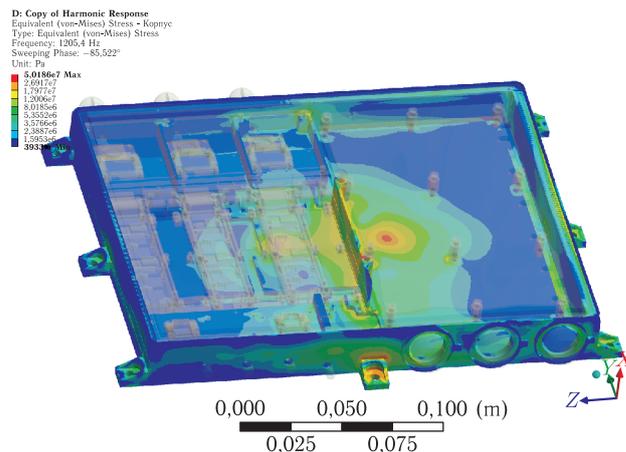


Рис. 11. Отклик корпуса и электронных плат прибора усилителя мощности УМ на гармоническое возбуждение на р. ч. 1205 Гц

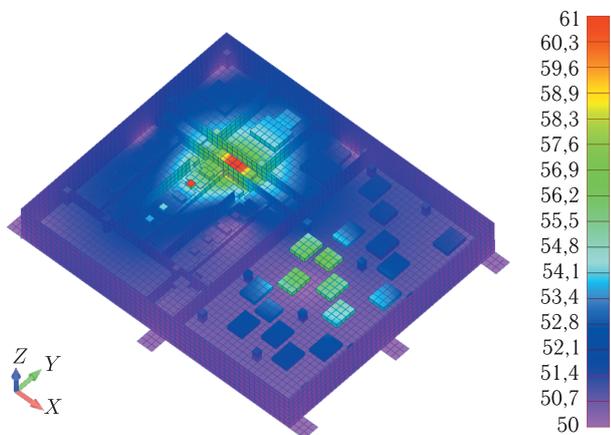


Рис. 10. Стационарное температурное состояние транзисторов СВЧ-каналов, плат усилителя мощности УМ

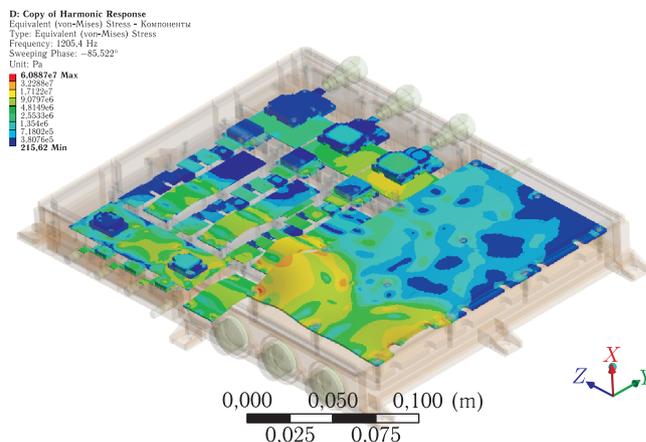


Рис. 12. Отклик ЭРИ электронных плат прибора усилителя мощности УМ на гармоническое возбуждение на р. ч. 1205 Гц

из меди, а также расположить транзисторы над тепловыми трубами штатной панели.

По результатам прочностного расчета, первоначальная конструкция прибора УМ была доработана введением дополнительных центральных крепежных винтов, которые снизили нагрузки (рис. 11–14).

Расположение виртуальных датчиков УМ, позволяющих получить распределение спектральных плотностей виброускорений в контролируемых точках, при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ) с заданными параметрами, приведено на рис. 13. Типичные графики распределения спектральной плотности ускорения (СПУ) усилителя мощности УМ показаны на рис. 14.

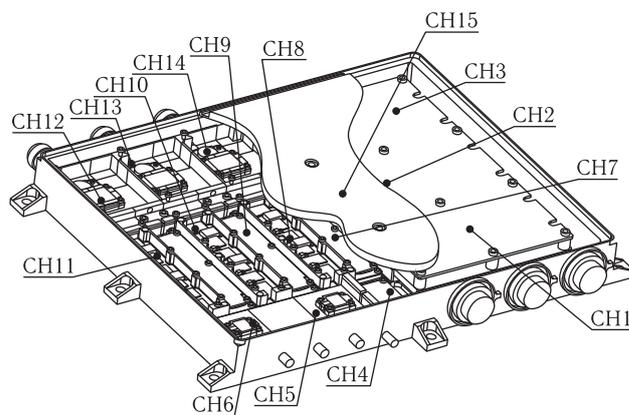


Рис. 13. Расположение виртуальных датчиков УМ

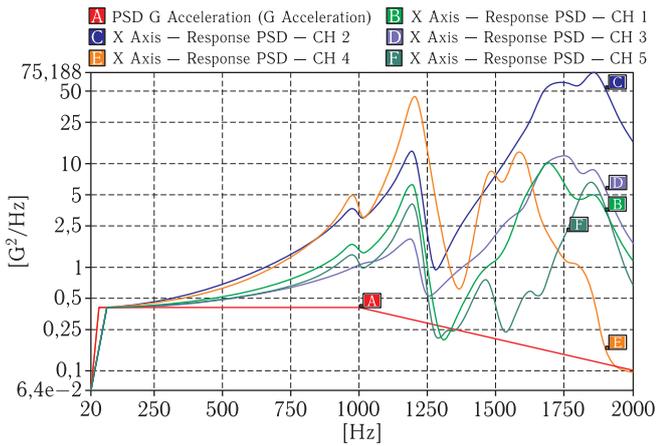


Рис. 14. Типичные графики распределения СПУ усилителя мощности УМ

Результаты расчета стационарного температурного состояния прибора командно-приемной информации (ДКПИ) были выполнены для трех режимов холодного резервирования: на рис. 15 представлен температурный режим платы ПВУ, а на рис. 16 — температурный режим плат ДКПИ_1, ДКПИ_2 — при резервной плате ДКПИ_3.

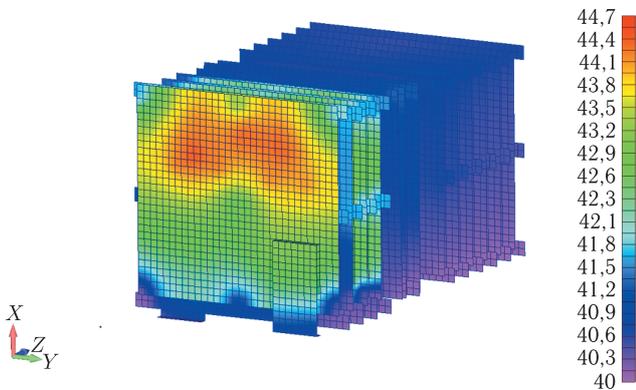


Рис. 15. Стационарное температурное состояние платы ПВУ прибора ДКПИ

По результатам прочностного расчета прибора ДКПИ конструкция прибора была доработана введением дополнительных центральных крепежных винтов (рис. 17, 18), которые снизили нагрузки.

В дальнейшем при разработке конструкции базового прибора с целью удобства компоновки приборов на плите его установочной поверхностью стало боковое ребро корпуса прибора. Уменьшение посадочной поверхности приборов потребовало

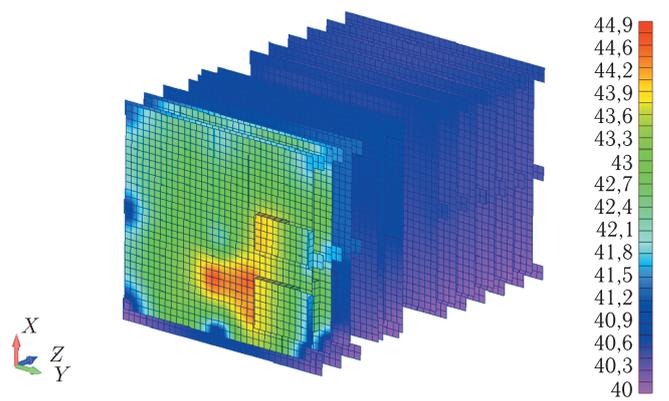


Рис. 16. Стационарное температурное состояние плат прибора ДКПИ

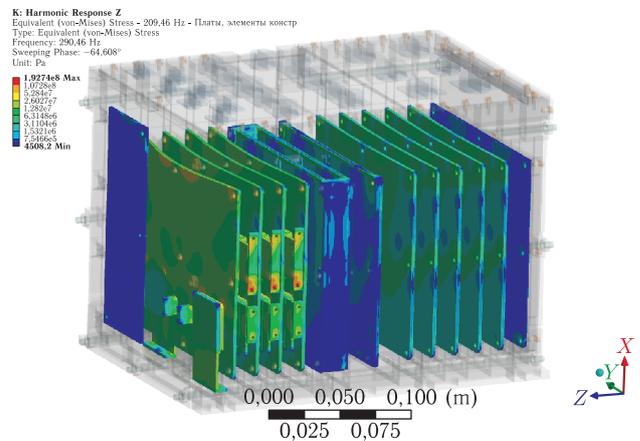


Рис. 17. Отклик электронных плат прибора ДКПИ на гармоническое возбуждение на р. ч. 290 Гц

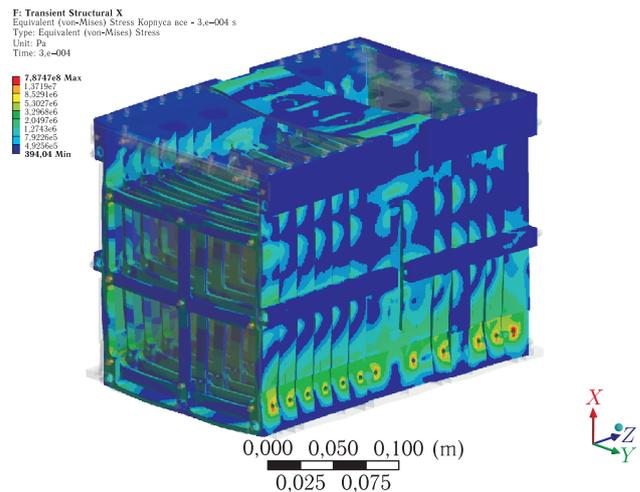


Рис. 18. Реакция составного корпуса прибора ДКПИ на ударное воздействие 700g, 0,2 мс

и от конструкторов и от разработчиков еще более внимательно отнестись к отводу тепла от ЭРИ.

В приборе, выполняющем в изделии функцию ППУ с мощностью тепловыделения 10,4 Вт, все платы размещены по обе стороны центрального основания, и даже при вертикальном расположении прибора на плите (рис. 1, 2) наибольшая температура ЭРИ составляет $+63,3^{\circ}\text{C}$.

Выводы

Математическое моделирование тепловых и прочностных режимов приборов оказалось чрезвычайно эффективным на стадии конструирования и изготовления приборов, и его можно рассматривать как первую ступень анализа приборов на стадии проектирования. В результате проведенных

расчетов конструкция многих приборов была доработана.

Проведение контроля динамических и температурных характеристик приборов на стадии ЛОИ и КОИ позволило уточнить прочностные и тепловые расчеты и устранить возможные недочеты как в конструкции, так и при изготовлении приборов, а также сократить объем натурных испытаний.

Список литературы

1. Карутин Н.В., Калмыков М.А., Шипова В.А. Комплексное решение теплового проектирования космических приборов нового поколения // *Авиакосмическое приборостроение*, 2007, № 5, с. 28–32.
2. Форрест П. Усталость металлов. Пер. с англ. под редакцией академика АН УССР С.В.Серенсена. М.: Машиностроение, 1968. 352 с.