

УДК 629.7.064.08:533.6.052

Циклические тепловые испытания бортового фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения

Д.О. Монахов

Аннотация

В работе предложена комплексная методика реализации тепловых испытаний бортовой аппаратуры. Методика позволяет выявлять дополнительные механизмы зачетных отказов аппаратуры и обеспечивает более полный анализ результатов испытаний, чем точечная оценка. Для реализации методики создан специальный инструмент – установка «Ресурс». Эффективность установки подтверждена испытанием на установке трех образцов приборов ИКФС-2 общей продолжительностью свыше 8 тысяч часов. Установка воспроизводит условия гермоотсека КА «Метеор-М», включая интенсивность теплообмена, что позволяет полностью имитировать условия эксплуатации электронных модулей.

Ключевые слова

ИКФС-2; Метеор-М; параметрическая надежность; бортовой фурье-спектрометр; наземная отработка; тепловые испытания.

Введение

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 для космического аппарата (КА) «Метеор-М» №2 предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере, общее содержание и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. В таблице 1 представлены его основные технические характеристики [1]. Прибор является аналогом созданного в Европе прибора IASI для КА «MetOp» [2].

Технические характеристики ИКФС-2 Таблица 1

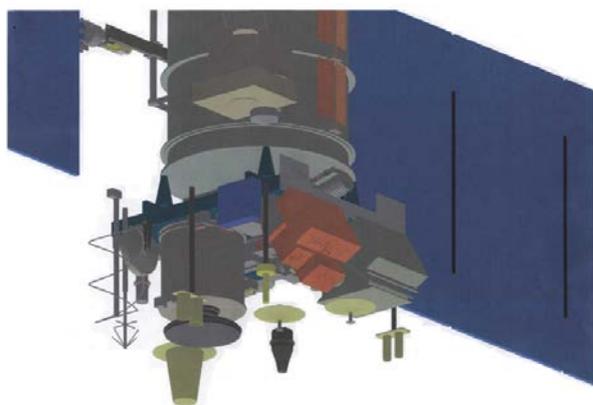


Рисунок 1. Прибор ИКФС-2

Рабочий спектральный диапазон	5...15 мкм
Спектральное разрешение, не более	0.5 см ⁻¹
Ресурс	5 лет
Погрешность измерения спектральной яркости объекта	0.5 К
Пространственное разрешение в надире	33 км
Периодичность получения интерферограмм	0.6 с
Информативность	603 кбит/с
Масса прибора	55 кг
Потребление в режиме рабочем (в режиме дегазации)	50 Вт (120 Вт)

Объем отработки данного прибора соответствует РК-98-КТ. ИКФС-2 уже прошел всю стандартную программу испытаний для изделий военной техники космического назначения. По literной документации изготовлен летный образец аппаратуры.

Кроме того, в ходе разработки прибора после проведения лабораторно-отрабочных испытаний было принято решение о необходимости проведения ресурсных испытаний ИКФС-2. Это было вызвано тем, что ни один из остальных видов испытаний не затрагивал потенциальных ресурсных механизмов возникновения отказов в изделии.

Целью данной работы является обоснование необходимости и роли термоциклирования в таких испытаниях, а также обобщение полученных к настоящему моменту результатов дополнительных циклических тепловых испытаний ИКФС-2. Кроме того, определено место данных испытаний в количественном подтверждении надежности ИКФС-2.

Для проведения указанных испытаний в Центре Келдыша разработана, изготовлена и применяется специальная установка «Ресурс» [3].



Рисунок 2. Общий вид установки «Ресурс».

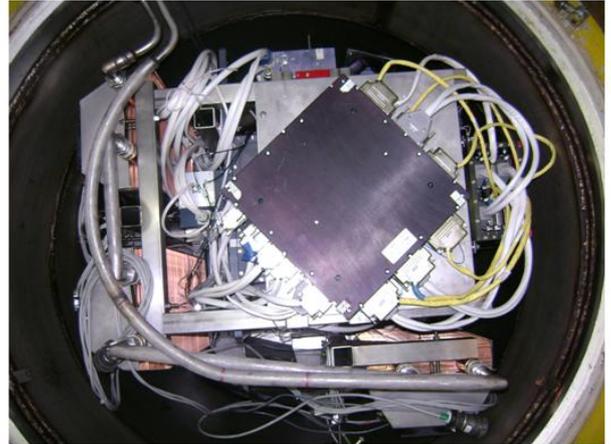


Рисунок 3. Размещение прибора.

Испытания на данной установке проводятся в среде сухого особо чистого азота, обоснование чего дано в [3]. Основным фактором, обеспечивающим моделирование условий эксплуатации, является отсутствие в сухом азоте окислительных компонентов, что препятствует возникновению окисных пленок в трущихся частях аппаратуры.

В установке полностью воспроизведен тепловой режим применения модуля электронного ИКФС-2 в гермоотсеке КА «Метеор-М» №2, включая коэффициенты теплоотдачи с печатных плат.

Аппаратура, размещенная в установке, может работать непрерывно месяцами, имитируя летную эксплуатацию. Однако, в утяжеление режима испытаний, было предложено реализовать в такой установке процедуру термоциклирования аппаратуры по причинам, приведенным ниже.

Первоначально термоциклирование и регулируемый тепловой режим рассматривались исключительно как требование ГОСТ Р В 50698-94 [4]. Этот ГОСТ позволяет применительно к бортовой радиоэлектронной аппаратуре со сроком активного существования более трех лет применять циклограмму ресурсных испытаний, указанную на рисунке 4.

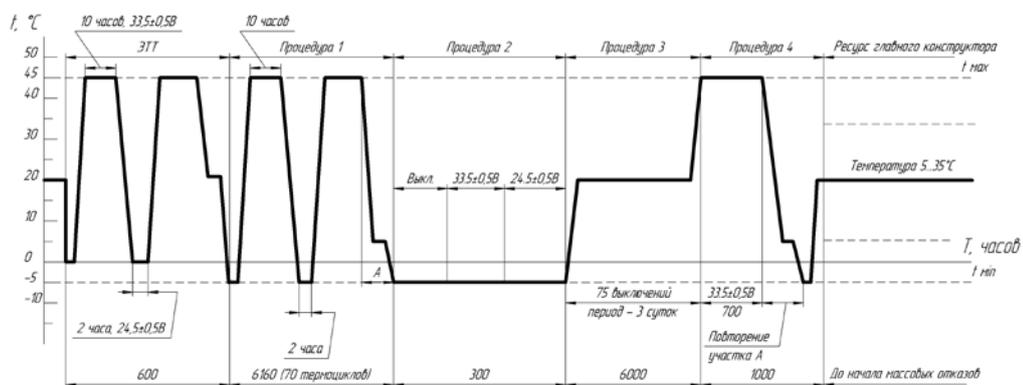


Рисунок 4. Циклограмма проведения испытаний по стандарту [4].

Затем было принято во внимание, что на этой же установке может быть в кратчайшие сроки (что важно для летного комплекта) проведен технологический прогон в соответствии с ГОСТ В 22571-77 [5] в двух различных термоэлектрических режимах. Окончательно, была предложена методика обработки результатов испытаний, охватывающая все стадии обеспечения надежности. Она включает следующие этапы работ:

1. Определение механизмов возникновения отказов путем возможно большей интенсификации отказов в ходе испытаний (один из способов реализации приведен ниже). Полнота реализованных в ходе испытаний механизмов отказов изделия подлежит анализу по результатам подготовки отчета по ресурсным испытаниям.

2. Расчет режимов работы отдельных элементов на основании протоколов испытаний прибора в целом. Определение ускоряющего воздействия применительно к данным конкретным элементам по справочным данным, и, при необходимости, дополнительных отдельных испытаний данных элементов.

3. Определение номенклатуры элементов, которые в силу отсутствия на них достаточного ускоряющего воздействия от режима испытаний оказались недогружены, и требуют проведения отдельных испытаний для подтверждения ресурса.

Методика оценки надежности по результатам испытаний

По пункту 1 можно обнаружить различие между принципом создания высоконадежного прибора (никогда не отказывает) и результатами отработки (отыскать те особые режимы работы, в которых наблюдается отказ)[6]. При проведении испытаний следует сделать честную попытку корректно довести свой высоконадежный прибор до отказа. Корректно - означает в рамках механизмов отказа, которые могут возникать в эксплуатации, то есть зачетных отказов. В качестве аналогии данного подхода можно предложить игру с самим собой в шахматы, что крайне сложно. В настоящее время сообщается о технологиях испытаний для решения данной задачи методом «сверхускоренных ресурсных испытаний» (highly accelerated life test – HALT) [6, 7]. Он включает 5 этапов испытаний: повышенная температура, пониженная температура, быстрое термоциклирование (5-25°С/мин), виброиспытания, одновременное воздействие вибрации и быстрого термоциклирования. Утверждается, что такая последовательность испытаний позволяет моделировать в сжатые сроки механизмы возникновения отказов в электронном и силовом оборудовании, электрорадиоизделиях. Предлагаемый режим испытаний похож на процедуру термомеханической тренировки, изложенной в общих технических условиях на целевой КА «Метеор-М» [8].

Без должного обоснования применять столь жесткие методы испытаний преждевременно. Однако именно на основании проводимых в настоящее время в Центре Келдыша ресурсных и циклических тепловых испытаний можно провести сравнение результатов испытаний прибора при нормальных или даже ускоренных режимах с испытанием тех же компонентов и элементной базы по методикам сверхускоренных испытаний. Сверхускоренные испытания следует провести не на изделии в целом, а на уровне узлов, модельных сборок, печатных плат.

По пункту 2 для определения указанного коэффициента ускорения необходимо чтобы либо исследуемый элемент отказал, либо чтобы для него был найден, определен и выбран параметр, который реагирует на наработку исследуемого элемента и может быть измерен. Примером экспериментального определения данного параметра могут служить испытания, описанные в работе [9]. По аналогии, в Центре Келдыша были проведены испытания свето- и фотодиодных пар для получения экспериментальной зависимости изменения их параметров от наработки [10]. Оптопары были скомпонованы из партий диодов, предназначенных для комплектации образцов аппаратуры ИКФС-2.

По результатам испытаний в составе изделия в нормальных условиях эксплуатации наработка фотодиодов в объеме 4 шт. не превышает 4850 часов при отсутствии отказов. Это не позволяет провести оценку надежности с помощью модели «успех-отказ».

В Центре Келдыша были проведены автономные испытания данных оптопар. По результатам автономных испытаний в форсированных режимах, наработка 2 образцов фотодиодов составляет с учетом коэффициента ускорения 15 000 часов [10]. Кроме того, в ходе испытаний выявлен параметр, по которому может быть выполнен параметрический расчет надежности исходя из значения нижнего доверительного интервала оценки, воспользовавшись методикой [11, стр. 219-224].

Во время испытаний температура поддерживалась на уровне $(+40\pm 3)^\circ\text{C}$, а напряжение питания при включенном состоянии составляла 10 В. Нормальные условия работы изделий: рабочая температура 10°C , напряжение питания 5В. В литературе [12, 13] имеются указания о возможных значениях коэффициента ускорения. Для испытываемых светодиодов и фотодиодов приняты средние значения коэффициентов ускорения, а именно: от температуры – $K_T = 6,5$; от повышенного напряжения питания $K_U = 5$; от цикличности включения и выключения $K_{Ц} = 3$. При условии независимости воздействия каждого фактора результирующий коэффициент ускорения равен произведению соответствующих коэффициентов, т.е.

$$K = K_T \cdot K_U \cdot K_{\text{Ц}}$$

По результатам испытаний получена деградация основного параметра оптопар (рисунок 5):

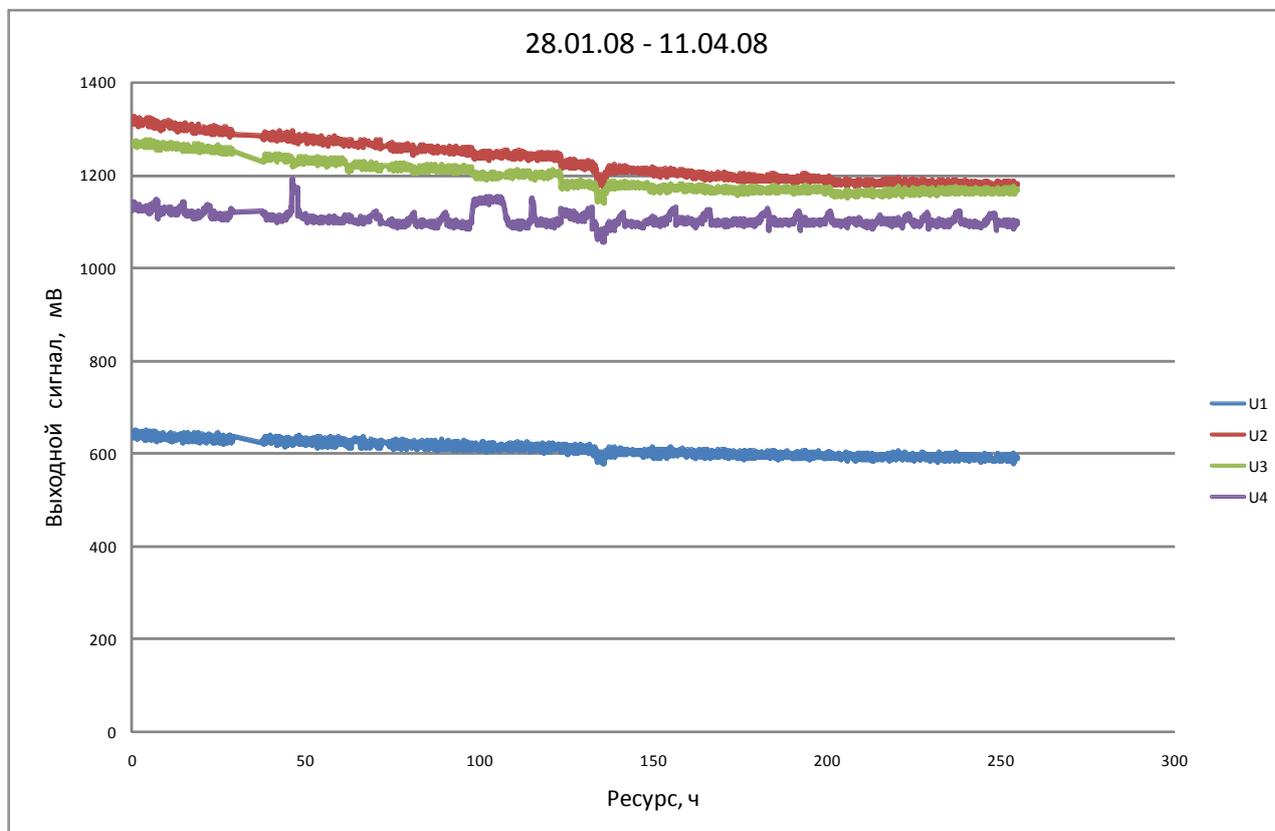


Рисунок 5. Зависимость выходных характеристик оптопар от наработки во время испытаний. К рассматриваемым фотодиодам относятся кривые синяя и зеленая.

В результате испытаний получено, что фотодиод ДФД2000ТО в ходе эксплуатации испытывает непрерывную во времени деградацию параметров, которая носит слабо затухающий линейный характер. Скорость этой деградации есть случайная величина. По результатам испытаний в нашем распоряжении есть 2 точечных значения скорости деградации за период, эквивалентный наработке в $T=15\ 000$ часов, полученные на 2 образцах фотодиодов:

Таблица 2. Основные результаты испытаний, рис.5 [10].

Порядковый номер фотодиода	Величина деградации ΔU , мВ	Относительная величина деградации $\Delta U / U_0$, %	Скорость деградации $\Delta U / T$, мВ/час
1	138.7	10.6%	0.0092
2	51.1	8.0%	0.0070

Предельная величина деградации определена как допустимая минимальная амплитуда сигнала с УРФ. Максимальное значение размаха интерферограммы УРФ составляет 2.5 В, минимальное значение, при котором еще имеет место равномерная работа маятника интерферометра – 0.8 В. При максимальном значении напряжения, сигнал с фотодиода без усиления соответствует 1307.9 мВ (момент начала испытаний – рис. 5), следовательно, минимально допустимое значение сигнала с фотодиода:

$$1307.9 * 0.8/2.5 = 418.5 \text{ мВ.}$$

При наработке в 44 500 часов, соответствующей ресурсу прибора, максимальная допустимая скорость деградации составит:

$$(1307.9-418.5)/44\ 500 = 0.02 \text{ мВ/час.}$$

Примем в качестве математического ожидания скорости деградации значение, соответствующее фотодиоду №1, как приводящее к отказу быстрее.

В качестве среднеквадратического отклонения примем оценку дисперсии, считая, что скорость деградации фотодиода №2 соответствует значению плотности вероятности распределения 0.25 от максимального. В таком случае распределение запишется как $N(0.0092;0.0014)^1$.

Вычислим функцию распределения коэффициента запаса, который определяется по формуле:

$$\eta = \frac{V_{\text{действ}}}{V_{\text{доп}}}$$

где $V_{\text{доп}}$ – допустимая скорость деградации – $V_{\text{доп}}=0.02$ мВ/час;

$V_{\text{действ}}$ – действующая, случайная величина скорости деградации, распределенная как $N(0.0092;0.0014)$.

В результате расчета получена функция распределения $N(2.199;0.327)$. Функция распределения коэффициента запаса получена исходя из точечных оценок скорости деградации. По этой причине параметры распределения являются случайными величинами. Для получения гарантированного результата необходимо перейти к интервальной оценке при доверительной вероятности 0.95, которая позволит получить одностороннюю нижнюю границу вероятности безотказной работы:

$$P_{\text{без}} = F\left(\frac{\eta_i - 1}{\eta_i \cdot k_v}\right)$$

¹ Краткое обозначение нормального распределения Гаусса-Лапласа с математическим ожиданием 0.0092 и среднеквадратичным отклонением 0.0014.

где цифра 1 в аргументе соответствует минимально допустимому значению коэффициента запаса;

F – функция нормированного нормального распределения;

$k_v = \frac{\sigma}{m}$ – коэффициент вариации, отношение дисперсии случайной величины σ к

оценке ее математического ожидания m .

η_i – нижняя оценка величины коэффициента запаса с доверительной вероятностью $\gamma=0.95$.

$$\eta_i = m - t_\gamma \cdot \sigma,$$

где t_γ - квантиль нормального распределения по уровню доверительной вероятности γ .

Для $\gamma=0.95$ $t_\gamma = 1.645$ [14].

В результате расчета для $P_{\text{ниж}}$ получена величина 0.99632 за 44 500 часов наработки, что в рассматриваемом случае дублированного светодиода является достаточным.

Подобные параметры выбраны также для других основных составных частей прибора, что показано в таблице 3:

Параметры, характеризующие работоспособность представительных электрорадиоизделий из комплектации аппаратуры ИКФС-2.

Таблица 3

№	Обозначение изделия	Функциональное назначение	Параметры	Конструктивное исполнение
1	МАТ02ЕН	Малозумящий согласованный сдвоенный транзистор	Смещение – 50 uV Шум – 1,0 nV/ \sqrt{Hz}	ТО-72
2	TPS79301DBV	Линейный регулятор напряжения	PSRR=70 dB, Noise-32 uV	SOT23
3	OP284ES	Операционный усилитель	Полоса – 4 MHz, Смещение – 65 uV, Шум – 3,9 nV/ \sqrt{Hz}	SO-8
4	BAS16	Диод	Время восстановления – 6 nS, ток утечки – 1 uA	SOT23
5	BAV170	Сдвоенный диод	Время восстановления – 0,8 nS, ток утечки – 1 pA	SOT23
6	BC846B	Транзистор	n-p-n, коэффициент шума – 10 dB, Полоса – 100 MHz	SOT23
7	LL4148	Диод	Время восстановления – 4 nS,	MiniMELF

Испытания данных изделий проводятся в составе аппаратуры ИКФС-2.

Также отметим, что испытания при повышенной температуре приводят к ускоренному старению клеевых соединений и герметиков [15]. Это приводит к снижению допускаемых напряжений сдвига для соединений.

Даже в одном приборе содержится значимое количество однотипных элементов. Данные по выходным характеристикам каждого из них при обработке результатов учитываются как самостоятельный результат испытаний.

Результаты испытаний

Всего на установке «Ресурс» подвергнуты испытаниям 3 образца прибора ИКФС-2. При этом летный образец, который проходил исключительно технологический прогон (приработку), успешно ее прошел.

Основной на данный момент объем испытаний проведен на технологическом образце ИКФС-2. Первый этап испытаний технологического образца ИКФС-2 уже был опубликован [3]. График температурных воздействий на данный образец приведен на рисунках 6 и 7.

На рисунке 6 показан первый неудачный этап проведения испытаний. При повышении температуры наблюдался отказ маятника интерферометра ИКФС-2, который на 10 цикле отказал уже при нагреве всего на 4°C! Как было обнаружено далее, восстановление работоспособности происходило только при снижении температуры ниже определенного уровня, который, в свою очередь также снижался. Если поначалу работа прибора восстанавливалась при возврате к нормальной температуре, то к 10 циклу требовалось уже охлаждение до 5°C. Благодаря возможности контроля и переключения комплектов, отказ был локализован до самостоятельного узла (усилитель сигнала с лазерной системы управления маятником (референтный канал). Для завершения испытаний были задействованы резервные комплекты данного усилителя. Испытания прошли успешно, режим испытаний показан на рисунке 7. По окончании испытаний была проведена дефектация усилителя. Нагрев конкретной точки соединителя РС-19 приводил к отказу и дальнейшему восстановлению после охлаждения данной точки, в точности как на испытаниях. Было обнаружено, что один из контактов разъема питания был недостаточно пропаян, и по нему нарушалась целостность цепи. Разъем был доработан. В остальных разъемах изделия данная неисправность отсутствует.

Температура среды и ИКФС-2, °С

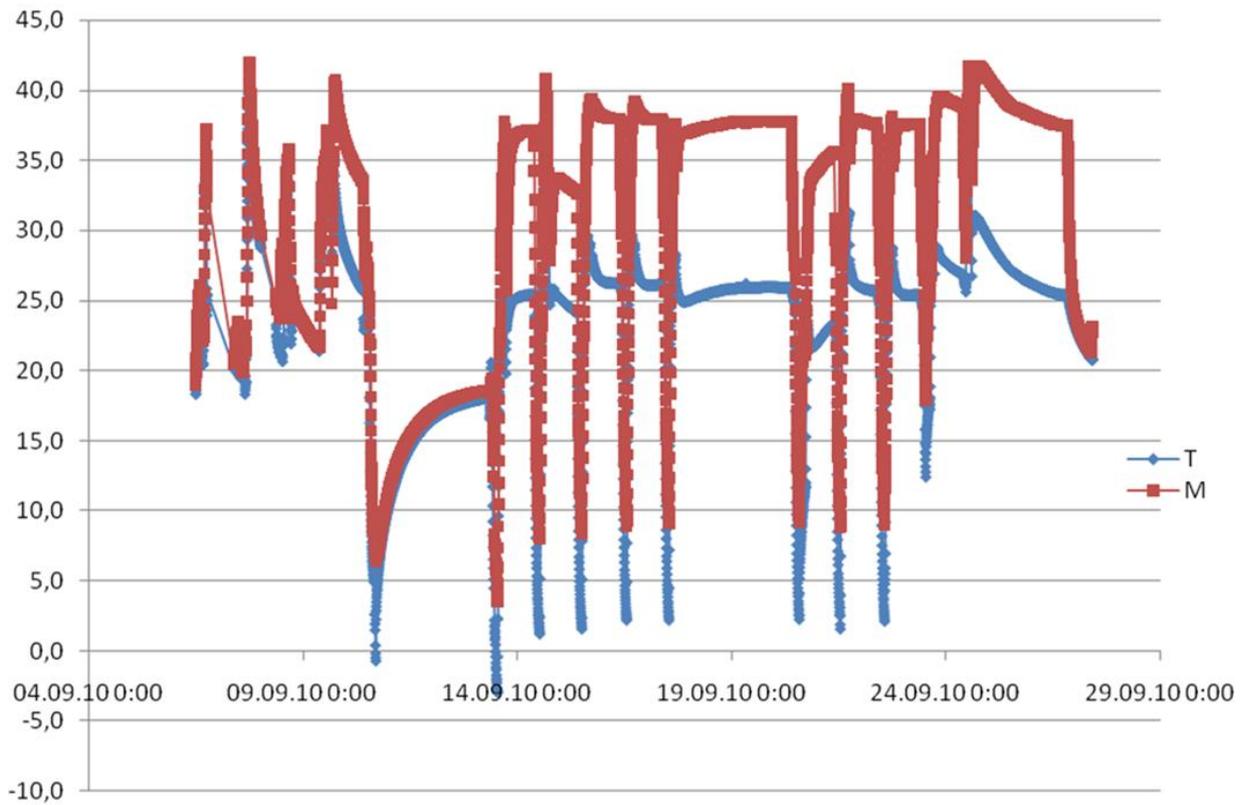


Рисунок 6. Начало циклических тепловых испытаний технологического образца ИКФС-2. Получен отказ одного из узлов. Красный – точка на электронном модуле, синий – точка на оптико-механическом блоке.

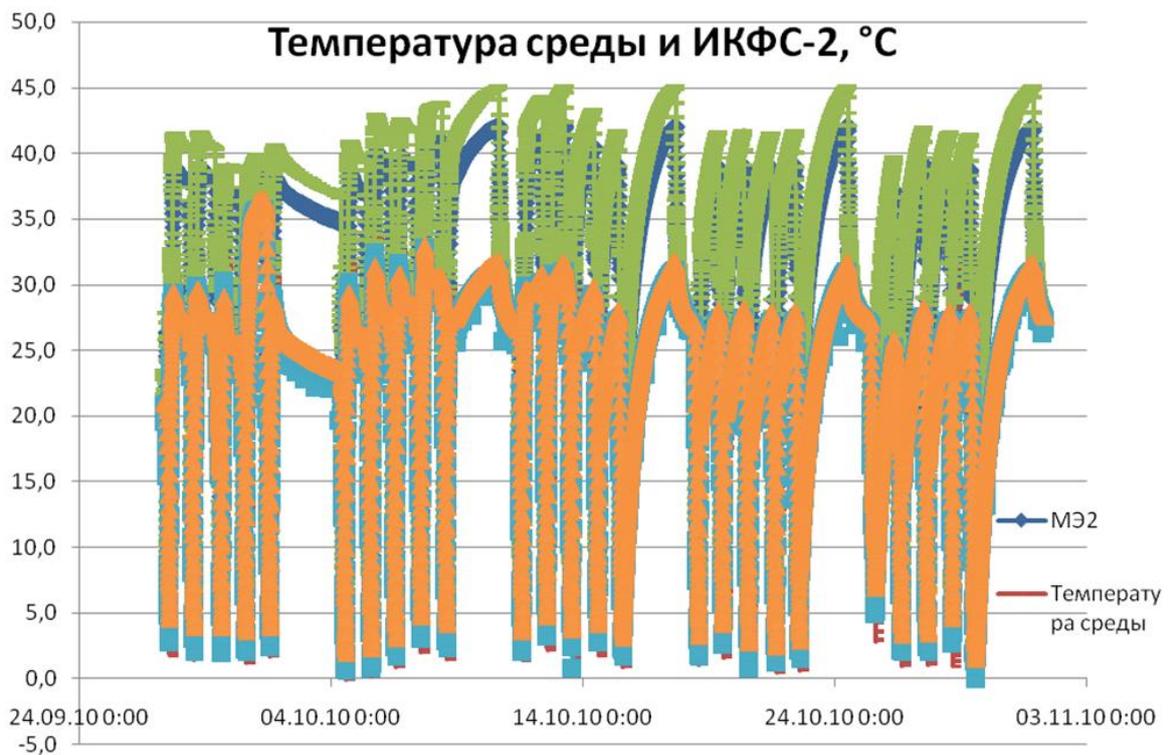


Рисунок 7. Режим успешных циклических тепловых испытаний аппаратуры ИКФС-2.

Следует отметить, что технологический образец в паузе между испытаниями, описанными в [3] прошел виброиспытания главного конструктора с режимом, утяжеленным в 1.5 раза, а также приемосдаточные виброиспытания без утяжеления режима. В результате циклограмма испытаний, которые прошел технологический образец за 6 месяцев описанных ресурсных испытаний показана на рисунке 8.

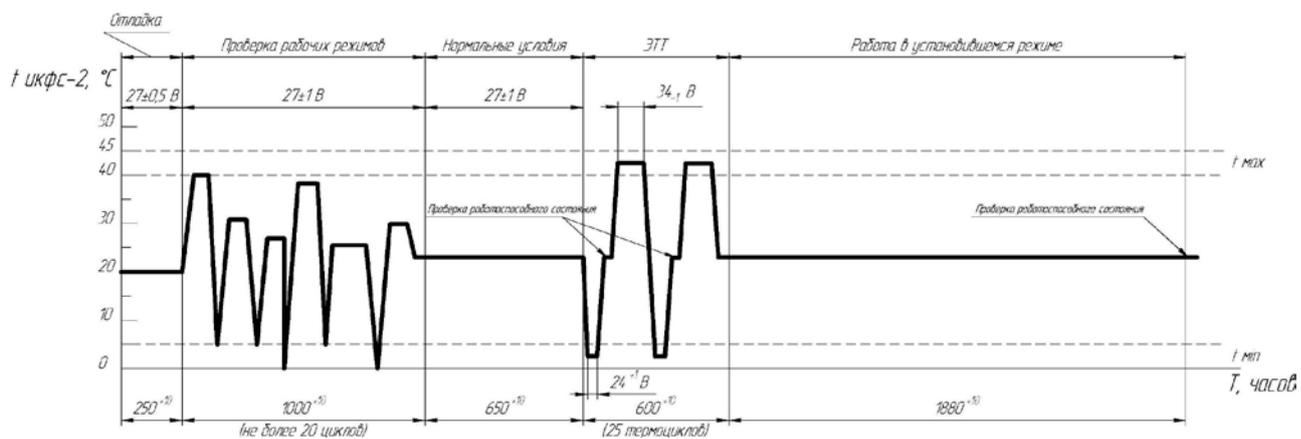


Рисунок 8. Испытания, проведенные на первом образце аппаратуры ИКФС-2.



Состав предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2

3. Виды испытаний



Рисунок 9. Состав предварительных испытаний аппаратуры ИКФС-2.

Назначение данных испытаний, помимо целей опытно-конструкторских работ, состояло в обнаружении механизмов отказов, связанных с циклическим тепловым воздействием (см. выше п. 1 методики). Обнаруженные механизмы были описаны в [3], а также отмечены выше.

В свою очередь вторая и третья части методики реализуются на втором испытуемом образце ИКФС-2 – образце прошедшем предварительные испытания и поставленном на циклические тепловые испытания в установке «Ресурс». Перечень испытаний на данном этапе приведен на рисунке 9. Этот образец, также как и первый, был дважды подвергнут виброиспытаниям. Данный прибор испытан пока только в течение 4 месяцев, отказов пока не наблюдается. Результаты испытаний приведены на рисунках 10-12.

Температуры блоков

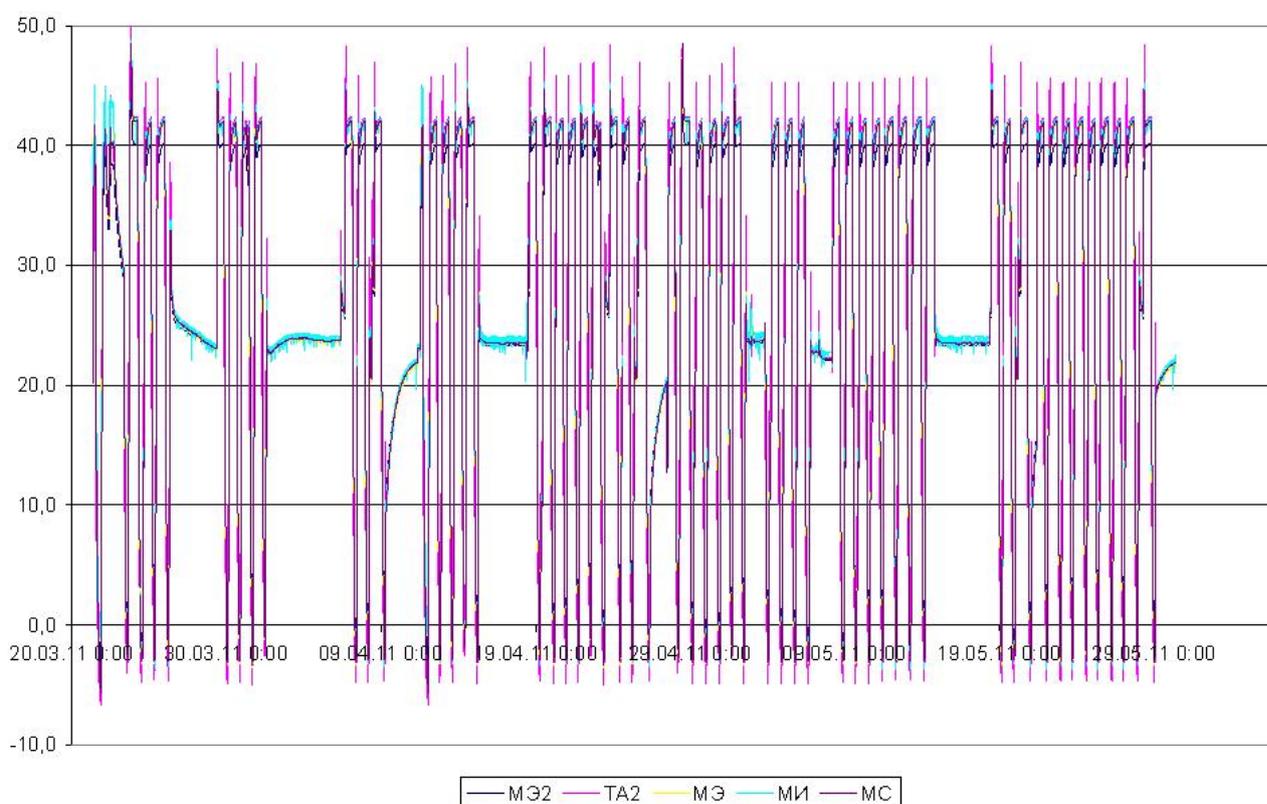


Рисунок 10. График циклических тепловых испытаний прибора во включенном и выключенном состоянии. Обозначения: МЭ2 – вторая точка на модуле электронном, ТА2 – вторая точка измерения температуры среды в камере, МЭ – первая точка на модуле электронном, МИ – точка на модуле интерферометра, точка на модуле сканера (оптико-механического блока).

Типовой термоцикл приведен на рисунке 11.

На рисунке 12 показан тепловой режим наработки аппаратуры при температуре, которая на 10°C ниже минимально возможной рабочей температуры. Пока на данных режимах отказов не получено, а, следовательно, требуется более полный анализ возможных механизмов отказов.

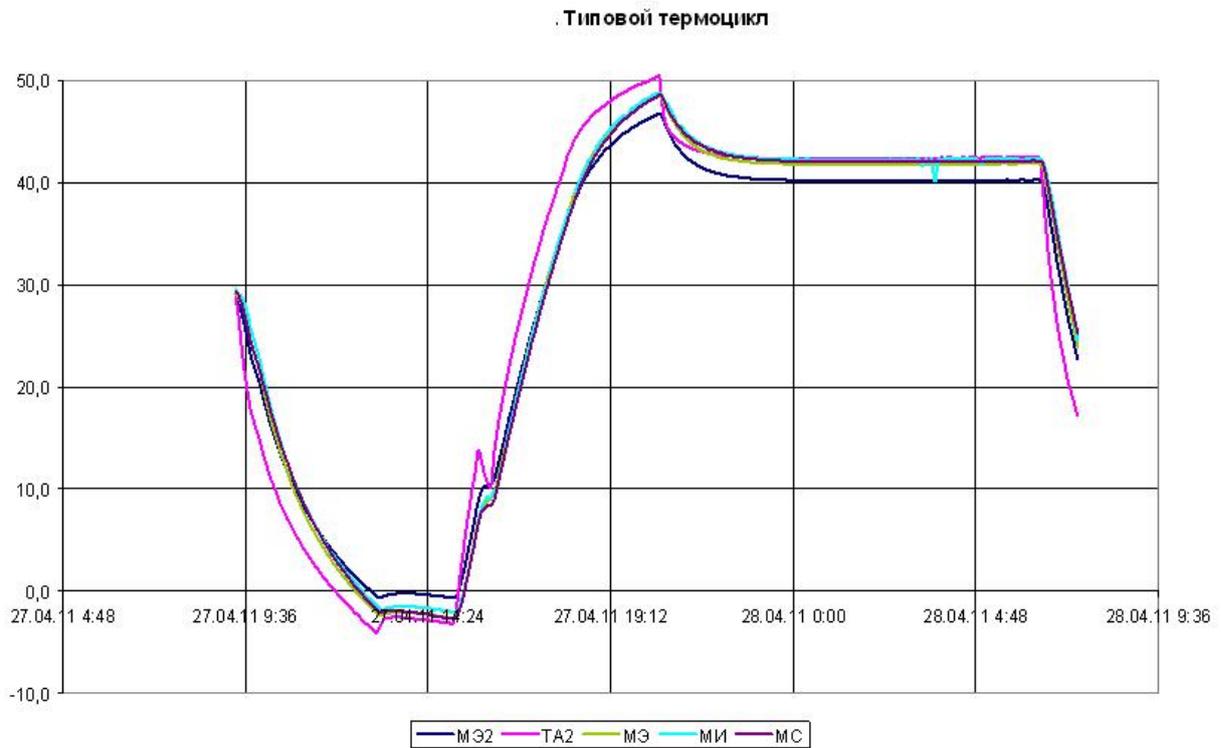


Рисунок 11. Форма типового термоцикла в ходе циклических тепловых испытаний.

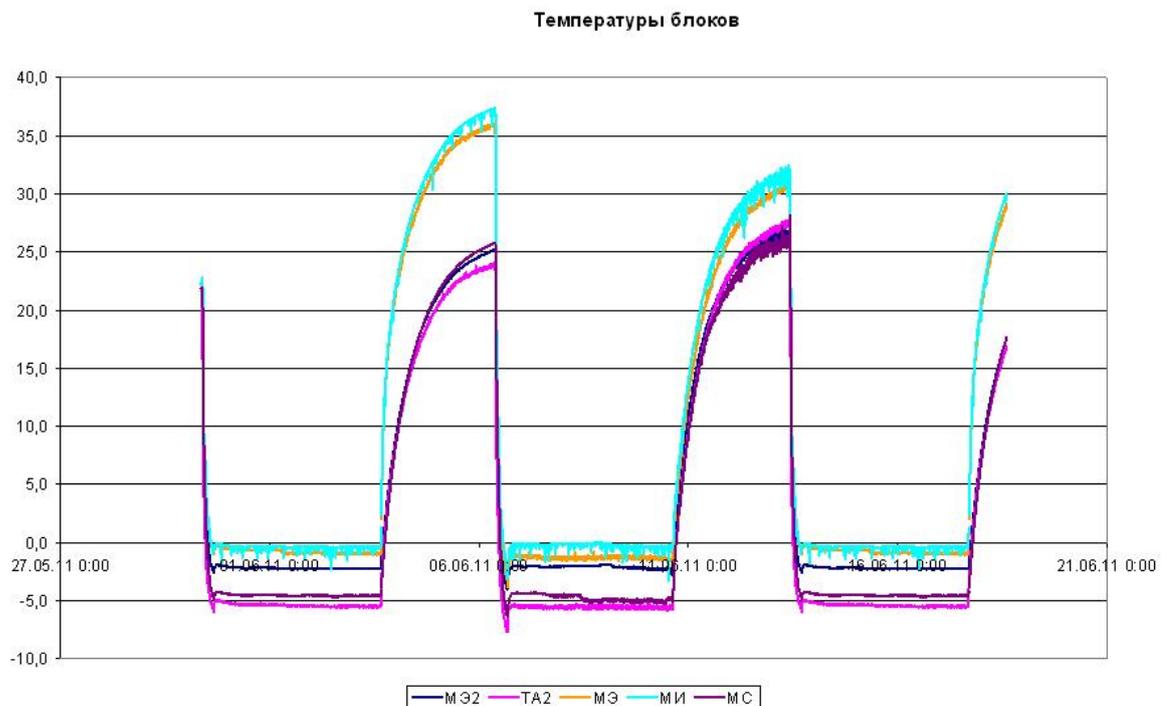


Рисунок 12. Форма типового термоцикла в ходе циклических тепловых испытаний.

В настоящее время данный образец продолжает испытываться в циклическом тепловом режиме.

Выводы по работе:

1. Предложена комплексная методика реализации тепловых испытаний бортовой аппаратуры с целью выявления и устранения возможных причин отказов аппаратуры, которая включает количественный анализ параметрической надежности комплектующих аппаратуры.

2. Методика позволяет выявлять дополнительные механизмы зачетных отказов аппаратуры и обеспечивает более полный анализ результатов, чем точечная оценка. Рассмотрение аппаратуры на уровне комплектующих позволяет использовать большой опыт их применения, накопленный и обобщенный в литературе (большинство комплектующих широко используются).

3. Для реализации методики создан специальный инструмент – установка «Ресурс». Обычная климатическая установка при условии обеспечения герметичности, заполнении особо чистым азотом и полной автоматизации превращается в эффективный инструмент по проведению тепловых испытаний и технологических прогонов бортовой аппаратуры, что подтверждено испытанием на установке трех образцов приборов ИКФС-2 общей продолжительностью свыше 8 тысяч часов (почти год непрерывных испытаний).

4. Установка воспроизводит условия гермоотсека КА, включая интенсивность теплообмена, что позволяет полностью имитировать условия эксплуатации модуля электронного. В данной установке работа в среде азота особой чистоты имитирует одно из условий работы трущихся пар в космосе – отсутствие окисной пленки. Данная установка применяется на всех этапах создания аппаратуры, при этом цели испытаний могут быть как исследование, так и подтверждение характеристик.

Библиографический список:

1. Десятов А.В., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М. и др. Технологический образец бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009, т. 1, с. 259-267.
2. L. Buffet, E. Pequignot, D. Blumstein et al. IASI instrument onboard MetOp-A: lessons learned after almost two years in orbit. ICSO Conference, Toulouse, 14-17 October 2008. <http://www.icsconference2008.com/cd/pdf/S20%20-%20Spectrometers%20-%20Buffet.pdf>
3. Монахов Д.О., Головин Ю.М. Ускоренные ресурсные испытания бортового фурье-спектрометра ИКФС-2. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010, т.7, номер 4, с. 240.
4. ГОСТ Р В 50698-94.
5. ГОСТ В 22571-77.
6. N. Doertenbach. HALT. Testing with a different purpose. <http://www.qualmark.com/resources/library-documents>.
7. J. Capitano. HALT/HASS explaining accelerated ageing. <http://www.acteq.fr/biblio/halt-hass---explaining-accelerated-aging.pdf>.
8. ОМ30.00.00.000 ТУ1. Космический аппарат «Метеор-М» №1. Бортовая аппаратура. Общие технические условия. (ОТУ 600А). 2010.
9. Y. Chen, S.M. Guertin et al. CMOS active pixel sensor technology and reliability characterization methodology. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40169/1/06-0252.pdf>.
10. Десятов А.В., Головин Ю.М. и др. “Проведение ресурсных испытаний светодиодов и фотодиодов”. НТО ЦК № 4800, Москва, 2008 г.
11. Галеев А.Г. и др. Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем. М.: Издательство МАИ. 2007 г.
12. Перроте А.И., Сторчак М.А. Ускоренные испытания изделий на надежность. М., «Машиностроение». 1975.
13. Перроте А.И., Сторчак М.А. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1976.
14. Янко Я. Математико-статистические таблицы. М.- Госстатиздат, 1961 г.
15. M. Chevalier, E. Dantras, et al. Correlation between real-life degradation and accelerated ageing results of epoxy-aluminum assemblies. Proc. 6th Int. Symp. Environmental Testing for

Space Programmes, Noordwijk, The Netherlands, 12–14 June 2007 (ESA SP-639, September 2007).

Сведения об авторах

Монахов Дмитрий Олегович, инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», тел. +7-985-214-48-44;
e-mail: dmitrymonahov@gmail.com