

## **Методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов**

**Быков А.П.\*, Пиганов М.Н.\*\***

*Самарский национальный исследовательский университет*

*имени академика С.П. Королева,*

*Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

*\*e-mail: bykal@yandex.ru*

*\*\* e-mail: kipres@ssau.ru*

**Статья поступила 04.03.2020**

### **Аннотация**

В статье приведена методика автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов. Автономные испытания предложено проводить в рамках конструкторско-доводочных испытаний для образцов, прошедших приемо-сдаточные испытания. В составе образцов не должно быть критичной по ресурсу электронной компонентной базы. В качестве объекта испытаний был выбран микропроцессорный контроллер температуры.

Описаны назначение и состав данного прибора. Данный прибор устанавливается на сотопанелях в негерметичных отсеках космического аппарата. Для выбора видов испытаний проведен анализ технических условий на прибор и результатов предыдущих испытаний. Методика предусматривает 14 видов испытаний. Проведено исследование влияния последовательности испытаний на их эффективность. Сделан выбор оборудования и испытательных воздействий. Проведены схемы испытаний на устойчивость к воздействию электромагнитного

поля. Предложена последовательность проведения данных испытаний. Дано метрологическое обоснование выбранных контрольно-измерительных средств.

Испытания при нормальных климатических условиях и номинальном напряжении питания проводились после завершения конструкторско-доводочных испытаний. Технологические тренировки проводились перед приёмно-сдаточными испытаниями.

**Ключевые слова:** автономные испытания, бортовой прибор, космический аппарат, методика, микропроцессорный контроллер температуры, схема, алгоритм испытаний, результаты испытаний.

### **Введение**

В процессе наземной экспериментальной отработки образцов ракетно-космической техники (РКТ) проводятся различные испытания: тепловые [1, 2], электрические [3, 4], вибродинамические [5], радиочастотные [6], радиационные [7] и др. Одной из важнейших задач любых испытаний РКТ является моделирование в эксперименте таких режимов, которые в наибольшей степени отвечают реальным условиям их транспортировки и эксплуатации [8].

Проведение испытаний и осуществление экспериментальной отработки изделий РКТ является одним из важных этапов процесса создания надежных и конкурентоспособных образцов. Испытания как основная форма контроля изделий представляет собой экспериментальное определение его количественных и качественных показателей при воздействии на него различных факторов в процессе функционирования и при его моделировании [9].

Экспериментальная отработка является составной частью всех этапов проектирования изделия. Она, как правило, завершает процесс разработки изделия [10]. В процессе испытаний проводят дефектоскопический контроль узлов и агрегатов. Для этих целей используют информационно-диагностические комплексы [11, 12]. Для успешного проведения испытаний важно оптимальное решение выбора оборудования [13]. Важным аспектом при этом является комплексная интерпретация результатов испытаний [14].

В связи со сложностью изделий РКТ широкое распространение получили автономные испытания. Эти испытания проводятся, как правило, в случае изготовления приборов и агрегатов, входящих в систему, на разных заводах [15]. В этом случае проводятся испытания отдельных приборов, блоков, узлов, агрегатов, входящих в состав изделия. Такие испытания обладают рядом достоинств: имеют более низкие материальные потери при аварийном исходе, позволяют измерять более широкий набор параметров, обеспечивают более низкую стоимость и набор большего объема статистики.

Важнейшей составляющей любых испытаний является метрологическое обеспечение [16].

Целью данной работы является разработка методики автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов (КА).

### **Выбор объекта и целей испытаний**

С учетом предыдущих разработок, результатов их испытаний и эксплуатации в качестве объекта испытаний был выбран микропроцессорный контроллер

температуры. Автономные испытания должны быть проведены в рамках конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) для образцов, прошедших приемно-сдаточные испытания. В составе образцов не должно быть критичной по ресурсу электронной компонентной базы (ЭКБ).

В качестве основных целей испытаний были определены следующие: подтверждение работоспособности образцов в условиях имитации внешних воздействующих факторов, близких к реальным; оценка соответствия образцов требованиям технического задания (ТЗ) и технических условий (ТУ) на основное изделие; подтверждение правильности выбора схемных и конструктивных решений; отработка конструкторской документации (КД) для присвоения требуемой литеры («0»); отработка технологической документации; подтверждение правильности применения ЭКБ и других комплектующих.

Цели испытаний не постоянны – они могут меняться на различных этапах проектирования, производства и эксплуатации [7].

Испытания образцов должны проводиться на производственной базе завода-изготовителя системы (прибора) с участием предприятий (отделов)-разработчиков.

### **Назначение и состав прибора**

Микропроцессорный контроллер температуры (МКТ) предназначен для управления агрегатами системы терморегулирования (СТР) космического аппарата при его штатной работе и при наземных испытаниях, а также для приема-передачи контрольной и командной информации по мультиплексному каналу обмена (МКО).

Прибор состоит из трех идентичных каналов (А, В, С). Каждый канал выполнен с применением микроконтроллера (МК) и выполняет следующие функции: прием сигналов с аналоговых датчиков (ДА), опрос контактных датчиков (ДК), опрос температурных датчиков (ДТ), опрос резистивных потенциометрических датчиков (ДР), прием восьмиразрядного кода от цифровых датчиков, выдачу команд управления, прием команд включения, отключения, прерывания, сброса, выдачу мажорированных тактовых импульсов, ведение информационного обмена по МКО, ведение информационного обмена по RS-485, выдачу телеметрических параметров в виде параллельного кода.

Каждый канал прибора содержит пять модулей. Это модули вторичного источника питания (ВИП), устройства управления (УУ), датчика температуры (ДТ), команд управления (КУ), формирования МТИ и опроса датчиков (ДП).

Каждый канал прибора функционирует под управлением МК по программе, прошитой в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) каждого канала. Задача программы каждого канала – производить циклический опрос ДТ, ДА, ДР, ДК, формировать по их показаниям управляющие воздействия в виде КУ, МТИ, формировать телеметрические параметры, содержащие информацию о текущем состоянии узлов прибора и внешних датчиков (ДТ, ДА, ДР, ДК). Каждый прибор допускает по линии МКО вводить корректирующие коэффициенты на отработку программы, а при наземных испытаниях задавать отработку отдельных фрагментов программы. Каждый канал прибора одновременно может выводить до 40 команд.

Для выбора видов испытаний проведем анализ технических условий на прибор.

### **Анализ технических условий**

Данный прибор устанавливается на сотопанелях в негерметичных отсеках КА. После монтажа прибор и его конструктивные элементы не должны иметь резонансов в диапазоне частот от 0 до 25 Гц и иметь минимальные значения переходных сопротивлений в соответствии с КД (чертежи СБ). Прибор должен быть работоспособен при напряжении питания от 23 до 32 В. Значение электрического сопротивления изоляции цепей прибора должно быть не менее 20 МОм при нормальных климатических условиях, 5 МОм – при повышенной и пониженной температуре среды, 1 МОм – при повышенной влажности среды (воздуха). Работа прибора не должна приводить к образованию помех амплитудой более 0,3 В. Прибор должен сохранять работоспособность при просадках напряжения питания до 22 В в течение 200 мс, а также при воздействии электромагнитных полей, не превышающих уровни, установленные в ГОСТ Р 51317.4.3-2006. Прибор должен сохранять работоспособность при воздействии магнитного поля напряженностью 400 А/м и электростатических разрядов.

Прибор выполнен по 3-х канальной схеме. Он должен быть работоспособен при и после воздействия виброускорений, одиночных механических ударов, линейных ускорений в обе стороны (режимы механических воздействий приведены далее), акустического шума со среднеквадратическим уровнем акустического давления 143,5 дБ в течение 120 с.

Данный прибор должен быть стойким и сохранять работоспособность при следующих климатических воздействиях: давление от  $10^{-6}$  до 800 мм рт.ст.,

температура от  $-20$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха – до 95% при температуре не выше  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Вероятность безотказной работы каждого прибора за время штатной работы  $T=43800$  ч не менее 0,96.

### Определение видов испытаний и испытательных воздействий

Задача выбора видов испытаний и последовательности их проведения является нетривиальной. Для определения видов испытаний и испытательных воздействий был проведен анализ результатов предыдущих испытаний. С учетом этих результатов и специфики основного изделия было выбрано 14 видов испытаний (табл. 1).

Таблица 1. Виды и последовательность проведения испытаний

№ п/п	Вид испытаний	Последовательность испытаний		
		1 вариант	2 вариант	3 вариант
1	Испытание на функционирование в нормальных климатических условиях	1	1	1
2	Испытание по обнаружению резонансов конструктивных элементов прибора (блока)	2	5	6
3	Испытание на прочность при воздействии транспортировочных нагрузок в составе изделия	3	6	7
4	Испытание на прочность и устойчивость при воздействии ШСВ и синусоидальной вибрации	4	2	8
5	Испытание на прочность и устойчивость при воздействии механических ударов	5	3	9
6	Испытание на прочность и устойчивость при воздействии линейного ускорения	6	4	10
7	Испытание на воздействие пониженной температуры среды	7	7	2
8	Испытание на воздействие повышенной температуры среды	8	8	3
9	Испытание на воздействие пониженного давления	9	9	4
10	Испытание на воздействие повышенной влажности	10	10	5
11	Испытание на стойкость к электростатическим разрядам	11	13	14

12	Испытание на безотказность в процессе длительного функционирования (испытания на безотказность)	12	14	11
13	Испытания на устойчивость прибора (блока) к воздействию электромагнитных полей с уровнем 1 В/м	13	11	12
14	Испытание на подтверждение работоспособности прибора (блока) при воздействии постоянного магнитного поля напряженностью 400 А/м	14	12	13

Было проведено исследование влияния последовательности испытаний (столбцы 3, 4, 5 табл. 1) на их эффективность. Установлено, что данная последовательность испытаний для указанных вариантов существенного влияния на результаты испытаний не оказывает.

Испытание на функционирование прибора в нормальных климатических условиях предложено проводить в следующей последовательности: технический осмотр, проверка массы, измерение переходного сопротивления, проверка электрических и входных цепей, проверка электрического сопротивления изоляции, проверка функционирования в ручном режиме.

Для обнаружения резонансов конструктивных элементов необходимо провести испытания на вибростенде последовательно в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Рекомендуются следующие режимы испытаний (табл. 2). Для их реализации был выбран вибростенд TV-59349/АІТ-440. Для подтверждения отсутствия резонансов на частотах до 25 Гц используется контрольный датчик.

Испытание на прочность при воздействии транспортировочных нагрузок, возникающих в составе изделия, целесообразно проводить на ударном стенде,



например STT-500, используя метод ускоренных испытаний. Режимы воздействий рекомендуется брать из табл. 3.

Таблица 2

Поддиапазон частот, Гц	Скорость прохождения		Амплитуда вибрации м/с <sup>2</sup> (g)
	Поддиапазон окт/мин	Гц/мин	
5-10	0,5	0,04	4,9 (0,5)
10-20	0,5	0,08	9,8 (1,0)
20-40	0,5	0,16	9,8 (1,0)
40-80	0,5	0,32	9,8 (1,0)
80-160	0,5	0,64	11,76 (1,2)
160-320	1,0	2,56	17,64 (1,8)
320-640	1,0	5,3	23,52 (2,4)
640-1280	1,0	10,6	23,52 (2,4)
1280-2500	1,0	21,2	16,7 (1,7)

Таблица 3

Амплитуда ударного ускорения, м/с <sup>2</sup> (g)	Длительность действия ударного ускорения, мс	Количество ударов	Ориентировочное количество ударов, в минуту
147,2 (15)	5-10	5000	40-80
98,1 (10)	5-10	15000	40-80

Проверку на прочность и устойчивость при воздействии вибрации, механических ударов, линейного ускорения (п.4-6) целесообразно проводить на следующем оборудовании: при воздействии вибрации в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях на вибростенде TV-59349/AIT-440; на ударном стенде 8999-6992 – при воздействии ударов в положительном направлении каждой из 3-х взаимно перпендикулярных осей; при воздействии линейного ускорения в обе стороны каждого из 3-х взаимно перпендикулярных осей – на центрифуге M155.

Рекомендуемые режимы приведены в табл. 4-7. В табл. 8 приведены расчётные значения амплитуды виброускорений на элементах конструкции прибора.

Испытания на воздействие пониженной и повышенной температур окружающей среды рекомендовано проводить в камере VC-7150.

Таблица 4

Номер режима	Поддиапазон частот, Гц							Продолжительность действия, с
	20	50	100	200	500	1000	2000	
	Спектральная плотность виброускорения, $\text{м}^2 \text{с}^{-4} \text{Гц}^{-1} (\text{г}^2/\text{Гц})$							
1	4,32 (0,045)	8,66 (0,09)	12,98 (0,135)	17,3 (0,18)	17,3 (0,18)	6,48 (0,067)	2,16 (0,023)	120
2	1,08 (0,011)	1,08 (0,011)	1,73 (0,018)	2,16 (0,023)	2,16 (0,023)	1,73 (0,018)	1,08 (0,011)	480
3	0,867 (0,009)	0,867 (0,009)	0,867 (0,009)	0,867 (0,009)	0,867 (0,009)	0,867 (0,009)	0,432 (0,005)	1500

Таблица 5

Номер режима	Поддиапазон частот, Гц	Амплитуда виброускорения, g	Продолжительность действия вибрации в каждом поддиапазоне частот, с
1	10-20	2,6-3,9	120
2	20-40	3,9	120
3	10-20	0,65	120
4	20-40	0,65	120

Таблица 6

Номер режима	Длительность действия ударного ускорения, мс	Амплитуда ускорения, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)	Количество ударных воздействий по каждой оси
1	2-10	98 (10)	14
2	0,5-2	392 (40)	16
3	0,5-2	294 (30)	18
4	0,5-2	540 (60)	2

Таблица 7

Номер режима	Амплитуда линейного ускорения ускорения, $\text{м}/\text{с}^2$ (g)	Время воздействия по каждому направлению каждой оси, с
1	70,1 (7,15)	600
2	4,9 (0,5)	1500

Ось	Резонансная частота ( $f_0$ ), Гц	Спектральная плотность виброускорения $W_0$ , $\text{м}^2/\text{с}^4$ Гц ( $\text{г}^2/\text{Гц}$ )	Добротность (Q)	Максимальная амплитуда виброускорения ( $A_{pЭАЭ}$ ), $\text{м}/\text{с}^2$ (g)
X	299,1	17,352 (0,18)	9,97	82,14 (8,37)
X	626,8	14,46 (0,15)	31,34	61,22 (6,24)
X	725,4	13,014 (0,135)	72,54	41,07 (4,18)
X	1621	4,1452 (0,043)	36,02	49,17 (5,01)
X	1931	2,41 (0,025)	38,62	39,52 (4,02)
Y	236,1	17,352 (0,18)	2,78	138,26 (14,08)
Z	1483	5,0128 (0,052)	5,7	129,97 (13,24)
Z	1761	3,2776 (0,034)	58,7	35,70 (3,64)

Для подтверждения работоспособности прибора в условиях, максимально возможно имитирующих реальные условия его функционирования, испытания по п. 8, 9 целесообразно совместить.

Перед испытаниями необходимо вскрыть прибор и на корпусе электрорадиоизделий (ЭРИ) модулей 1 уровня нанести высокочувствительные термоиндикаторы плавления (ТИП). Затем необходимо его закрыть и обеспечить достижение теплового равновесия в приборе. Зафиксировать показания температурного датчика. Выдержать прибор во включенном состоянии в течение 24 ... 100 часов при предельной повышенной температуре (обычно  $50^{+3}$  °С) и провести проверку электрического сопротивления изоляции. Рабочую повышенную температуру обычно принимают равной  $40^{+3}$  °С. После окончания испытания прибор необходимо вскрыть для осмотра состояния (цвет) ТИП.

В ряде случаев целесообразно проводить термовакуумные испытания по методике [17].

Весьма важным является испытания на стойкость к электростатическим разрядам (ЭСР) [18, 19]. Их необходимо проводить в экранированном помещении.

При этом технологические кабели от пультов необходимо закрывать металлизированной тканью (артикул 56041М), которую заземляют не менее, чем в 2-х местах. После проверки работоспособности прибора и установке на нём номинального напряжения питания проводят воздействие на него от генератора электростатического разряда (ГЭР). Частота повторения разрядов должна составлять 50Гц. Необходимо использовать следующие варианты воздействия: через воздушно-искровой разрядник напряжением разряда 20кВ; через емкостную антенну, изменяя напряжение разряда от 2 до 20кВ; через контактный наконечник с образованием искрового разряда напряжением 20кВ.

Воздействие ГЭРом осуществляют последовательно в каждую из 4-х вершин прибора. Стойкость к воздействию ЭСР оценивается по состоянию индикаторов пультов. Время каждого воздействия составляет 7 ... 10с. После испытания проверяется электрическое сопротивление изоляции и функционирование прибора.

Ресурсные испытания проводятся при непрерывной работе прибора. Нарботку ресурса целесообразно распределять следующим образом:

- 10% – при повышенной температуре среды и максимальном напряжении питания;
- 10% – при повышенной температуре среды и минимальном напряжении питания;
- 10% – при пониженной температуре среды и минимальном напряжении питания;
- 10% – при пониженной температуре среды и минимальном напряжении питания;

- 10% – технологические тренировки (от 100 часов);

- 10% – при нормальных климатических условиях и номинальном напряжении питания.

Испытания при нормальных климатических условиях и номинальном напряжении питания проводятся после завершения КДИ. При этом через каждые 1000 часов испытаний проводятся контроль функционирования прибора.

Технологические тренировки проводятся перед приемо-сдаточными испытаниями.

Суммарная наработка прибора к началу лётных испытаний должна быть не менее 6 месяцев.

Испытания по п. 13, 14 необходимо проводить в безэховой камере или экранированном помещении в нормальных климатических условиях. Схема испытаний на устойчивость к воздействию электромагнитного поля приведена на рис. 1. Испытуемый прибор устанавливают на стол из непроводящего материала на пластину заземления. В качестве пластины используют медный или алюминиевый лист толщиной 0,25 мм или более. Минимальный размер листа 1×1 м. Пластина заземления должна быть соединена с контуром защитного заземления экранированного помещения. Прибор устанавливают через изолирующую подставку толщиной не менее 10 мм.

Испытания необходимо проводить в диапазоне частот от 80 до 1000 МГц. Значение шага перестройки не должно превышать 1% от основной частоты. Допускается линейная интерполяция между значениями частоты, установленными

при калибровке электромагнитного поля (ЭМП). Последовательность испытания следующая:

1. Собрать схему испытаний по рис. 1.
2. Установить на генераторе рабочую частоту 80 МГц и откалибровать для создания однородного ЭМП напряженностью 1 В/м в рабочей зоне прибора.
3. Провести облучение включенного прибора электромагнитным полем (ЭМП) с напряженностью 1 В/м.
4. Провести облучение включенного прибора ЭМП изменяя рабочую частоту от 80 до 1000 МГц. Время облучения во всём диапазоне частот составляет 2 мин. Частоту сигнала перестраивают при амплитудной модуляции синусоидальным сигналом частотой 1 кГц с коэффициентом модуляции 80%.

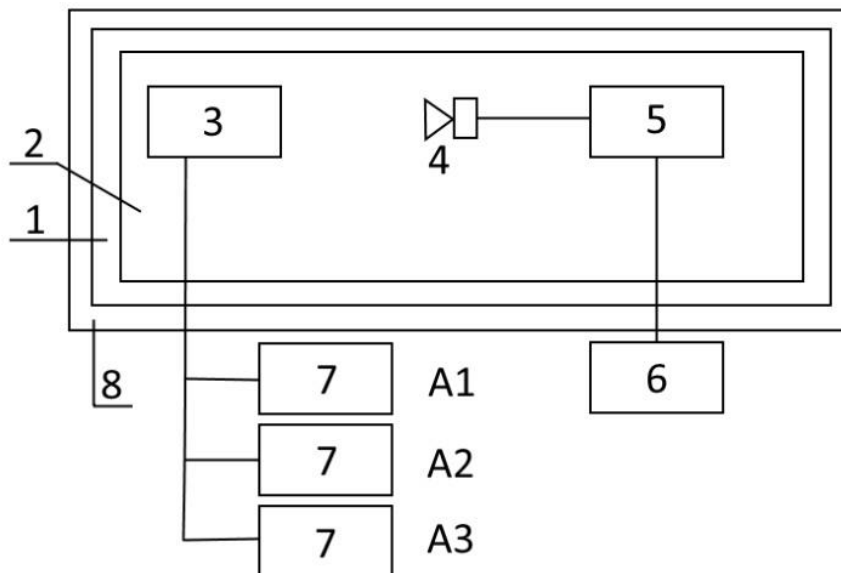


Рис. 1. Схема испытаний на устойчивость к воздействию электромагнитного поля: 1 – стол; 2 – пластина; 3 – прибор; 4 – антенна; 5- усилитель; 6 – генератор сигналов; 7 – пульты контроля; 8 – безэховая камера

Схема рабочего места для получения постоянного магнитного поля напряженностью 400 А/м приведена на рис. 2. Основным элементом являются магнитные катушки (А1, А2). Каждая катушка должна иметь 132 витка провода сечением не менее 1 мм<sup>2</sup> (длина провода одной катушки составляет 660м, сопротивление 11,9 Ом при сечении 1 мм<sup>2</sup>). Провод должен быть выведен на контакты вилки с допустимым током на контакт не менее 6А и рабочим напряжением не менее 100В. Вилка должна быть закреплена на катушке. Намотку вести виток к витку, в несколько слоев, между слоями изоляцию не прокладывать. Используется провод типа ПЭВТЗ, ПЭВ, ПНЕТ-имид с эмалевой изоляцией.

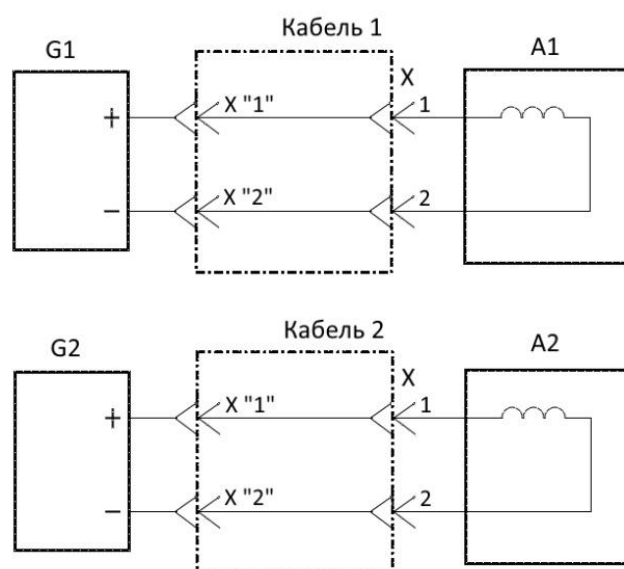


Рис. 2. Схема рабочего места для испытания стойкости к воздействию постоянного магнитного поля

Материал каркаса-алюминий. Требования к катушке приведены на рис. 3. Допускаются изменение длины намотки (75 мм) под другой профиль. Требования к катушкам определены расчетно-экспериментальным путем. Кабели 1 и 2 должны иметь длину от 2,5 до 3м. Сечение провода должно составлять не менее 0,5 мм.

Рабочее место с катушками должно быть аттестовано в соответствии с ГОСТ 8.568-2017.

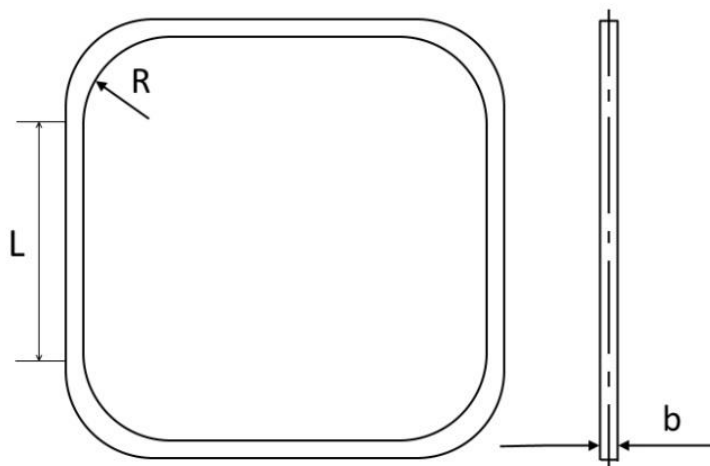


Рис. 3. Конструкция магнитной катушки

Испытание на подтверждение работоспособности прибора при воздействии постоянного магнитного поля проводится в следующей последовательности:

1. Собрать рабочее место (рис. 2), расположить магнитные катушки на расстоянии  $650 \pm 50$  мм друг от друга. При этом их оси симметрии должны совпадать и быть расположены горизонтально.

2. На источниках G1, G2 установите указатели на напряжение  $(48 \pm 1)$  В и ток защиты  $(5 \pm 1)$  А. Включите источники питания G1, G2.

3. Расположите датчик магнитного поля в центре катушки A1. Изменяя напряжение на источниках G1 и G2 (при этом значения токов источников должны отличаться не более чем на  $0,2$  А), добиться, чтобы измеритель магнитного поля показывал от 400 до 500 А/м в центре катушки A1. Повторить эту процедуру, установить датчик в центре катушки A2, затем – в центре системы из двух катушек.



4. Установите прибор в центре системы из двух катушек на приспособление из немагнитного материала. Ось «X» прибора должна быть расположена горизонтально и совпадать с осью симметрии катушек. Расположите датчик магнитного поля на приспособлении рядом с прибором максимально близко к началу координат.

5. Включите прибор для испытаний в ручном режиме. Включите источник G1 и G2. Проведите контроль работоспособности в течение не менее 10 минут. Выключите прибор. Выключите источники G1, G2.

6. Установите прибор так, чтобы его ось «Y» была расположена горизонтально и совпадала с осью симметрии катушек. Датчик магнитного поля расположите у начала координат. Повторите п.5.

7. Установите прибор так, чтобы его ось «Z» была расположена горизонтально и совпадала с осью симметрии катушек. Датчик магнитного поля расположите как в п.6. Повторите п.5.

8. Проведите испытания прибора в обратном направлении его осей x, y, z в соответствии с п.п. 1-7.

При проведении испытаний по п.2 определяются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) конструктивных элементов прибора и отсутствие резонанса на них в диапазоне частот от 0 до 25 Гц. Оценка амплитуд виброускорений на элементах конструкции производится по полученным графикам АЧХ. Полученные значения не должны превышать допустимых значений амплитуд виброускорений по ТУ на ЭРИ. При проведении испытаний по п.п. 3-6 до и после механического

воздействия проводится контроль электрической схемы, электрического сопротивления изоляции и функционирования прибора.

Аналогичный контроль проводится при проведении испытаний по п.п. 7-10. При проведении испытаний по п.12 проводится контроль функционирования прибора с заданной (500 или 1000 ч) периодичностью.

При проведении испытаний необходимо соблюдать меры защиты прибора от статического электричества. В процессе проверки и исследования методики автономных испытаний использовалось оборудование и контрольно-измерительные приборы, приведенные в таблице 9.

В ряде случаев целесообразно проводить испытания ЭКБ [20].

Таблица 9

Наименование и обозначение	Диапазон	Погрешность
Анализатор спектра R&S FSP13	20 Гц / 9 кГц-13,6 ГГц ??	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$
Антенна дипольная активная П6-51 ИУШЯ.464651.006 ТУ	от 0,009 до 300 МГц от 13 до 22 дБ	$\pm 2$ дБ
Антенна дипольная активная П6-52 ИУШЯ.464651.005 ТУ	от 300 до 1000 МГц от 20 до 35 дБ	$\pm 2$ дБ
Антенна логопериодическая широкополосная STLP 9128E	от 80 до 1500 МГц от 0 до 22 дБ	$\pm 2$ дБ
Генератор сигналов СВЧ R&S SMR27	от 10 МГц до 27 ГГц	$\pm 3 \cdot 10^{-6}$
Усилитель AR50WD1000		
Генератор электростатических разрядов 51.0810.09 (ГЭР)	2-20кВ 50Гц	
Источник питания Б5-71/2М ТУ РБ 100694318.001-2001	0,1-50 В 0,1-6 А	$\pm(0,008 U_{уст}+0,1)$ В $\pm(0,002 \max+0,05)$ А
Магнитометр бесконтактный ДМ-002	от 0 до 600 мкТл	$\pm(0,05 V_{и}+5)$ мкТл
Катушка магнитная для получения магнитного поля	от 400 до 500 А/м	

### Результаты испытаний

Проведенные по разработанной методике испытания показали, что данный прибор соответствует всем требованиям ТУ и КД. В таблице 10 в качестве примера приведены результаты контроля величины переходного сопротивления между

электрическими цепями прибора (пп. 1-6, 9-10 –  $R_{п}$  после испытаний; пп. 3'-5', 7'-8', 10' –  $R_{п}$  после вскрытия прибора). Как видно из таблицы 10 максимальное значение переходного сопротивления  $R_{п}$  наблюдалось между цепями 12 и 14 при контроле прибора после испытания его на прочность и устойчивость к воздействию механических ударов. Величина  $R_{п}$  составила 210 мкОм. В соответствии с КД она должна быть не более 1200 мкОм.

Таблица 10

Величина переходного сопротивления по КД, мкОм													
$\leq 2000$													
Фактическое сопротивление, мкОм													
Номер пункта табл. 1	1	2	3	3'	4	4'	5	5'	6	9	7', 8'	10	10'
Между основанием и цепью №14	27	32	28	29	28	28	32	35	32	30	25	27	30
Величина переходного сопротивления по КД, мкОм													
$\leq 1200$													
Фактическое сопротивление, мкОм													
Цепь 14-1	134	106	113	130	101	120	116	120	141	130	130	128	130
Цепь 14-2	134	104	109	130	100	120	108	120	145	130	140	125	130
Цепь 14-3	137	112	110	120	101	120	111	140	142	130	130	135	130
Цепь 14-4	139	106	107	120	100	110	109	140	145	130	120	130	130
Цепь 14-5	142	108	113	130	103	120	110	140	142	140	140	136	140
Цепь 14-6	136	105	108	120	101	120	110	140	148	150	140	116	150
Цепь 14-7	153	118	126	140	109	120	120	150	149	160	140	122	150
Цепь 14-8	130	109	113	120	104	120	114	150	150	140	130	120	160
Цепь 14-9	100	118	120	120	103	100	106	140	121	120	100	115	110
Цепь 14-10	113	107	110	120	99	120	107	140	110	130	100	75	110
Цепь 14-11	86	99	95	100	75	90	95	150	98	120	80	69	90
Цепь 14-12	156	147	160	140	150	150	66	210	175	180	130	163	50
Цепь 14-13	180	156	150	140	140	140	137	180	138	160	150	134	150

По результатам испытаний были сделаны следующие замечания: после испытания на воздействие пониженного давления на крышке прибора появились вздутия (в 2-х местах) покрытия из никеля; шайбы, используемые при креплении кожуха к стойке, не перекрывают элементные отверстия кожуха; маркировка чертежного и порядкового номера на печатных платах нанесена в труднодоступном месте; при установке ЭРИ на печатные платы используется недостаточное

количество мастики У-9М; на ряде печатных плат имеются доработки монтажа проводом; изменился цвет ТИ на резисторе R8 модуля №3.

После этого были проведены дополнительные исследования.

### **Заключение**

Разработка методики автономных испытаний бортовых радиоэлектронных приборов космических аппаратов, которая включает методы, оборудования, режимы, алгоритмы и время выполнения операций, метрологическое обеспечение испытаний.

Проведена верификация данной методики, которая показала ее высокое качество. Все цели автономных испытаний достигнуты. Время испытаний на влияние внешних воздействующих факторов сокращено на 8%. На этот же процент увеличены ресурсные испытания при нормальных климатических условиях. Экспертная оценка по методу Дельфы показала, что предлагаемый вариант автономных испытаний позволит предположительно сократить стоимость комплексных испытаний примерно на 10%.

По результатам испытаний внесены изменения в КД и карты рабочих режимов ЭРИ. Откорректирован технологический маршрут изготовления прибора.

### **Библиографический список**

1. Колчанов И.П., Делков А.В., Лавров Н.А., Кишкин А.А., Ходенков А.А. Математическое моделирование тепловых испытаний космических аппаратов с

применением криогенных экранов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 56 - 64.

2. Казаков В.А., Сенюев И.В. Измерение распределения температуры на поверхности образца при испытаниях в тепловых аэродинамических трубах // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81065>

3. Везенов В.И., Иванов А.В., Кононенко А.Ю., Капитанов В.А., Межевихин А.Ю., Морозов С.С., Фалеев О.В. Сериков С.А. Основные принципы создания комплексов автоматизации наземных электроиспытаний и подготовка к пуску РКН на примере РКН типа «Союз» // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества»: сборник материалов. - Самара: СГАУ, 2009. С. 102 - 104.

4. Ильин А.Н., Прокофьев Е.Н., Гришаев Д.Ю. Обеспечение электрических испытаний космических аппаратов наземным силовым оборудованием // V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («V Козловские чтения»): сборник материалов. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. Т. 1. С. 559 - 561.

5. Баюшев С.В. Применение конечно элементного моделирования при проектировании и топологической оптимизации испытательной оснастки для вибродинамических испытаний // V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («V Козловские чтения»): сборник материалов. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. Т. 2. С. 168 - 176.

6. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. ГОСТ 30804.4.3-2013. – М.: Стандартиформ, 2014. – 43 с.
7. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. – М.: Техносфера, 2005. – 504 с.
8. Лисейкин В.А., Моисеев Н.Ф., Фролов О.П. Основы теории испытаний. Экспериментальная отработка ракетно-космической техники. – М.: Машиностроение-Полет. Виарт Плюс, 2015. – 260 с.
9. Кручинин М.М., Кузьмин Д.А. Математическое моделирование копровых испытаний шасси вертолета // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77093>
10. Колесников А.В. Испытания конструкций и систем космических аппаратов: курс лекций. – М.: Изд-во МАИ, 2007. - 105 с.
11. Павлов П.В., Попов Ф.Н. Информационно-диагностический комплекс дефектоскопического контроля // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76780>
12. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57019>
13. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57879>

14. Сучков К.И. Об интерпретации результатов испытаний компонентов радиолокационных станций при оценке рисков ее создания // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57872>
15. Беляков И.Т. Зернов И.А. Антонов Е.Г. и др. Технология сборки и испытаний космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
16. Четвергов М.В., Корюшкин А.В., Петров В.В., Локтев В.А. Метрологическое обеспечение измерений и испытаний параметров ФПЗС // V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («V Козловские чтения»): сборник материалов. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. Т. 2. С. 332 - 333.
17. Быков А.П., Андросов С.В., Пиганов М.Н. Методика тепловакуумных испытаний приборов космического аппарата // Надёжность и качество сложных систем. 2019. № 3 (27). С. 78 - 83.
18. Костин А.В., Пиганов М.Н. Методика измерения помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2 (4). С. 804 - 810.
19. Столяров А.Н., Гаврилов А.М. Исследования устойчивости работы комплекса автоматики и стабилизации системы электроснабжения космического аппарата к электростатическим разрядам // II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения»): сборник материалов. Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 352 - 353.

Труды МАИ. Выпуск № 111

<http://trudymai.ru/>

20. Смирнов К.К., Сухов А.Г., Цимбалов А.С. Проблемы проведения испытаний микросхем в металлополимерных корпусах типа BGA // Труды МАИ. 2017. № 93.

URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80366>