

## Методика испытаний бортовой аппаратуры на воздействие электростатических разрядов

А.А. Демидов, М.Н. Пиганов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
443086, Россия, г. Самара,  
Московское шоссе, 34

**Аннотация – Обоснование.** Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью повышения достоверности и качества оценки устойчивости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к электростатическим разрядам. **Цель.** Исследование возможностей использования электронного потока в вакууме в качестве испытательного воздействия на бортовую радиоэлектронную аппаратуру космических аппаратов при оценке ее стойкости к электростатическим разрядам. **Методы.** Натурный эксперимент, исследовательские лабораторные испытания, моделирование, макетирование, экспертные оценки. В статье рассмотрены условия существования электронного потока в режимах «электронный прожектор» и «сканирование». В качестве объекта испытаний был применен макет радиоэлектронного устройства, который ранее использовался для испытания в атмосфере воздуха. Он был конструктивно доработан с учетом размеров, схемы подключения, оснастки и электрофизических характеристик вакуумной камеры. Доработанный макет представляет собой модуль первого уровня с расположенными внутри корпуса антеннами. В ходе эксперимента использовались измеритель вакуума, киловольтметр, цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц, высоковольтный кабель, двухпроводная линия, гермоплита, электронная пушка. Требуемый вакуум создавали с помощью системы автоматизированной откачки. **Результаты.** Экспериментально установлены условия существования электронного потока в вакуумной камере с давлением до  $10^{-7}$  мм рт. ст. Получены результаты исследовательских испытаний радиоэлектронного модуля в режимах «электронный прожектор» и «сканирование». Исследованы основные виды помех от действия электростатических разрядов. Проведен анализ осциллограмм. На основе этих результатов разработана методика испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на воздействие электростатических разрядов. Предложенная методика обеспечивает проведение испытаний при уровне рабочего разрядного тока до 30 мкА с энергией частиц от 5 до 50 кэВ. **Заключение.** Методика испытаний и средств ее реализации соответствует основным требованиям ГОСТ «Устойчивость к электростатическим разрядам» и может быть использована при наземных испытаниях бортовой аппаратуры КА при четырех степенях их жесткости.

**Ключевые слова** – электростатический разряд; испытательное воздействие; бортовая аппаратура; «электронный прожектор»; вакуумная камера; помехи.

### Введение

В процессе эксплуатации космических аппаратов (КА) под влиянием солнечной радиации и заряженных частиц происходит электризация их поверхностей. При этом индуцируются электростатические заряды и могут возникать электростатические разряды (ЭСР). Это вызывает появление электромагнитных помех, которые могут негативно повлиять на работоспособность бортовой аппаратуры (БА), бортовых кабельных сетей и электронных компонентов. Влиянию этих факторов сильно подвержены КА с длительным сроком активного функционирования. В связи с этим для таких КА и БА на этапах экспериментальной отработки предусмотрены различные виды контроля и испытаний, в том числе на воздействие электростатических разрядов [1–4].

Ранее А.В. Костиним были проведены исследования по влиянию ЭСР на функционирование

БРЭА и бортовых кабельных сетей, а также предложены методика испытания с помощью ГЭР и меры защиты от полей (ЭМП), создаваемых разрядами.

Однако такие испытания не учитывают влияния многих факторов космического пространства, в частности глубокого вакуума. Это снижает достоверность результатов испытания и не позволяет определить реальные параметры электризации космического аппарата КА и бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). В данной статье предлагается другой вариант испытаний – путем воздействия электронного потока в режимах «электронный прожектор» и «электронное сканирование».

*Цель данной работы* – исследование возможностей использования электронного потока в вакууме в качестве испытательного воздействия на бортовую радиоэлектронную аппаратуру при оценке ее стойкости к ЭСР.

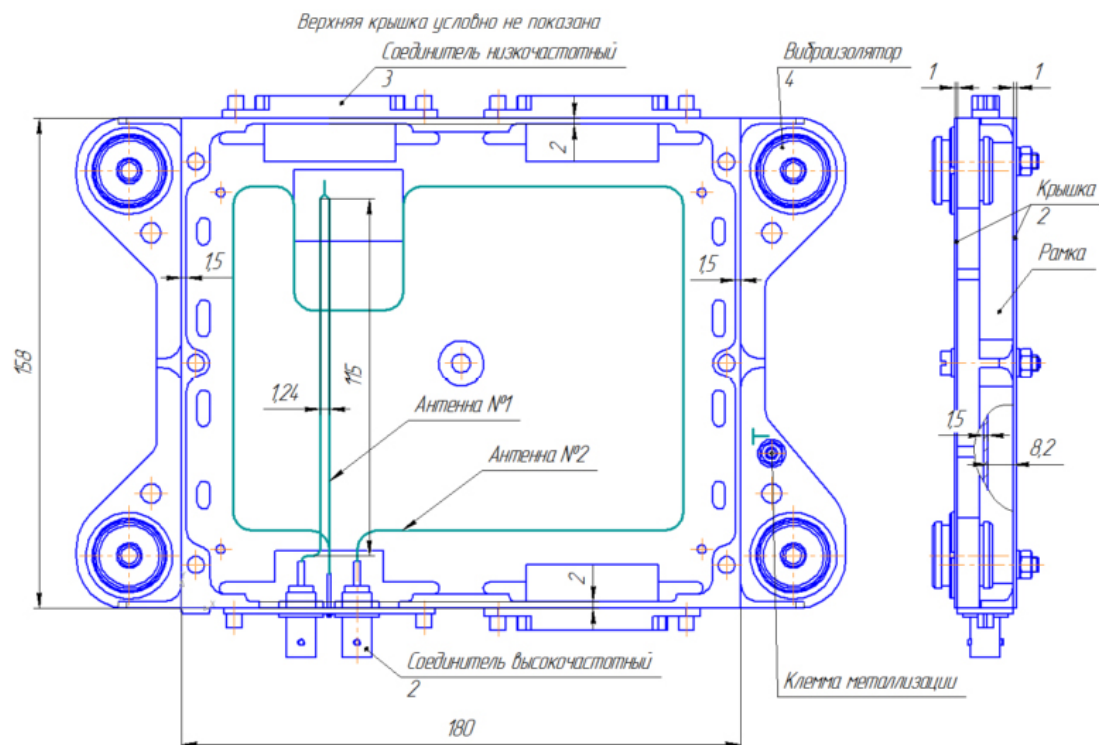


Рис. 1. Макет прибора с указанием расположения антенн № 1 и № 2  
Fig. 1. Layout of the device indicating the location of antennas No. 1 and No. 2



Рис. 2. Фотография макета  
Fig. 2. Photo of the layout

## 1. Описание объекта испытаний

В качестве объекта испытаний (ОИ) был использован макет радиоэлектронного устройства, который ранее исследовался на воздействие электростатического разряда с помощью ГЭР в атмосфере воздуха. За основу был взят макет, описанный в [5]. Он был конструктивно доработан с учетом размеров, схемы подключения, оснастки и электрофизических характеристик вакуумной камеры. Доработанный макет представляет собой модуль первого уровня с расположенными внутри корпуса антеннами № 1 и № 2 (рис. 1). На рис. 2 приведена фотография макета.

Антенны подключаются к высокочастотному соединителю со значением волнового сопротивления 50 Ом через коммутатор каждая по отдель-

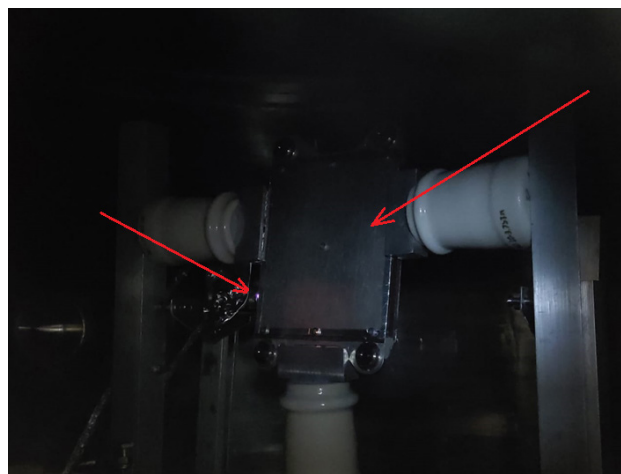


Рис. 3. Облучаемая плоскость образца во время проведения испытаний  
Fig. 3. The irradiated plane of the sample during testing

сти. Коммутатор выполнен на основе электромагнитных реле. Через высокочастотный соединитель к антеннам подключен цифровой осциллограф с помощью специального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом. Длина кабеля составляла 1 м.

## 2. Методика эксперимента

В режиме «электронный прожектор» ОИ устанавливался в стойку на поворотном столе [6]. В вакуумной камере создается пониженное давление величиной до  $(5-8) \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. После этого

Таблица 1. Параметры ЭП в режиме «электронный прожектор». Антенна № 1. Эксперимент № 1  
 Table 1. Parameters of the EP in the «electronic spotlight» mode. Antenna No. 1. Experiment No. 1

№ п/п	Ускоряющее напряжение ИПЭ, кВ	Факт возникновения ЭСР	Характеристики помехи от ЭСР на осциллографе				Амплитуда напряжения на киловольтметре, кВ	Время саморазряда ОИ при максимальной зарядке, с
			$U_{н.}, В$	$U_{в.}, В$	$t_{ф. \text{имп.}}, мс$	$f_{ЭСР}, Гц$		
1	5	Нет	-	-	-	-	0-5	1
2	6	Нет	-	-	-	-	0-6	1
3	7	Нет	-	-	-	-	0-7	1
4	8	Есть	160	607,6	18	0,005	0-6	1
5	9	Есть	82	538	25	0,02	3-8	2
6	10	Есть	420	18	10	0,1	0-10	2
7	11	Есть	2	26	12	0,27	0-8	1
8	12	Есть	2	62	10	0,47	0-5	1
9	13	Нет	-	-	-	-	0-7	1
10	14	Нет	-	-	-	-	0-6	1
11	15	Нет	-	-	-	-	0-6	1
12	16	Нет	-	-	-	-	0-5	1
13	17	Нет	-	-	-	-	0-7	1
14	18	Нет	-	-	-	-	0-10	2
15	19	Нет	-	-	-	-	0-8	1
16	20	Нет	-	-	-	-	0-7	1

Таблица 2. Параметры ЭП в режиме «электронный прожектор». Антенна № 2. Эксперимент № 1  
 Table 2. EP parameters in the «electronic spotlight» mode. Antenna No. 2. Experiment No. 1

№ п/п	Ускоряющее напряжение ИПЭ, кВ	Факт возникновения ЭСР	Характеристики помехи от ЭСР на осциллографе				Амплитуда напряжения на киловольтметре, кВ	Время саморазряда ОИ при максимальной зарядке, с
			$U_{н.}, В$	$U_{в.}, В$	$t_{ф. \text{имп.}}, мс$	$f_{ЭСР}, Гц$		
1	5	Нет	-	-	-	-	0-5	1
2	6	Нет	-	-	-	-	0-6	1
3	7	Нет	-	-	-	-	0-7	1
4	8	Нет	-	-	-	-	0-4	1
5	9	Нет	-	-	-	-	0-5	1
6	10	Нет	-	-	-	-	0-10	2
7	11	Нет	-	-	-	-	0-6	1
8	12	Есть	0,6	0,6	500	0,003	0-5	1
9	13	Нет	-	-	-	-	0-7	1
10	14	Нет	-	-	-	-	0-5	1
11	15	Нет	-	-	-	-	0-6	1
12	16	Нет	-	-	-	-	0-6	1
13	17	Нет	-	-	-	-	0-6	1
14	18	Нет	-	-	-	-	0-12	1
15	19	Нет	-	-	-	-	0-10	2
16	20	Есть	3,6	16,4	100	0,003	0-8	1

устанавливается ускоряющее напряжение от 5 до 20 кВ и ток пучка электронов величиной порядка 30 мкА. Производится облучение заданных поверхностей исследуемого образца. На рис. 3 стрелками показаны облучаемые поверхности. Время воздействия электронного потока при каждом значении ускоряющего напряжения составляло не менее 10 мин. Напряжение измеряли киловольт-

метром. Для измерения поверхностных и наведенных помех использовался цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц.

### 3. Результаты эксперимента

В таблицах 1–4 приведены основные параметры электронного потока (ЭП) в режиме «электронный прожектор» и характеристики помех от ЭСР,

Таблица 3. Параметры ЭП в режиме «электронный прожектор». Антенна № 1. Эксперимент № 2  
Table 3. EP parameters in the «electronic spotlight» mode. Antenna No. 1. Experiment No. 2

№ п/п	Ускоряющее напряжение ИПЭ, кВ	Факт возникновения ЭСР	Характеристики помехи от ЭСР на осциллографе			
			$U_{н.}, В$	$U_{в.}, В$	$t_{ф. имп.}, мс$	$f_{ЭСР}, Гц$
1	5	Нет	-	-	-	-
2	6	Нет	-	-	-	-
3	7	Нет	-	-	-	-
4	8	Есть	346	122	100	0,005
5	9	Есть	82	538	50	0,02
6	10	Есть	10	130	7	0,1
7	11	Есть	82	538	30	0,27
8	12	Есть	154	230	40	0,47
9	13	Нет	-	-	-	-
10	14	Нет	-	-	-	-
11	15	Нет	-	-	-	-
12	16	Нет	-	-	-	-
13	17	Нет	-	-	-	-
14	18	Нет	-	-	-	-
15	19	Нет	-	-	-	-
16	20	Нет	-	-	-	-

Таблица 4. Параметры ЭП в режиме «электронный прожектор». Антенна № 2. Эксперимент № 2  
Table 4. EP parameters in the «electronic spotlight» mode. Antenna No. 2. Experiment No. 2

№ п/п	Ускоряющее напряжение ИПЭ, кВ	Факт возникновения ЭСР	Характеристики помехи от ЭСР на осциллографе			
			$U_{н.}, В$	$U_{в.}, В$	$t_{ф. имп.}, мс$	$f_{ЭСР}, Гц$
1	5	Нет	-	-	-	-
2	6	Нет	-	-	-	-
3	7	Нет	-	-	-	-
4	8	Нет	-	-	-	-
5	9	Нет	-	-	-	-
6	10	Нет	-	-	-	-
7	11	Нет	-	-	-	-
8	12	Есть	2,3	26,9	100	0,003
9	13	Нет	-	-	-	-
10	14	Нет	-	-	-	-
11	15	Нет	-	-	-	-
12	16	Нет	-	-	-	-
13	17	Нет	-	-	-	-
14	18	Нет	-	-	-	-
15	19	Нет	-	-	-	-
16	20	Есть	1,6	1,6	100	0,003

Таблица 5. Параметры помех в двухпроводной линии  
Table 5. Interference parameters in a two-wire line

Напряжение на контактном наконечнике, кВ	Амплитуда напряжения, В	Фронт, нс	Длительность, мкс
5	-28 +30	2,5	1
10	-58 +60	2,5	5
15	-80 +84	2,5	6
20	-104 +114	2,5	6

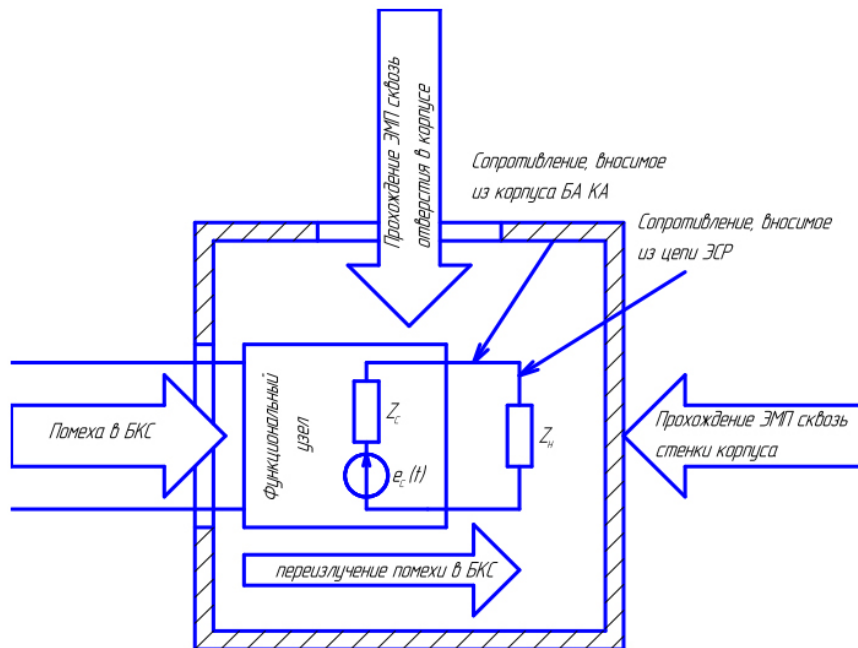


Рис. 4. Схема (физическая модель) формирования помех в цепях бортовой аппаратуры КА  
 Fig. 4. Scheme (physical model) of interference generation in circuits of on-board spacecraft equipment

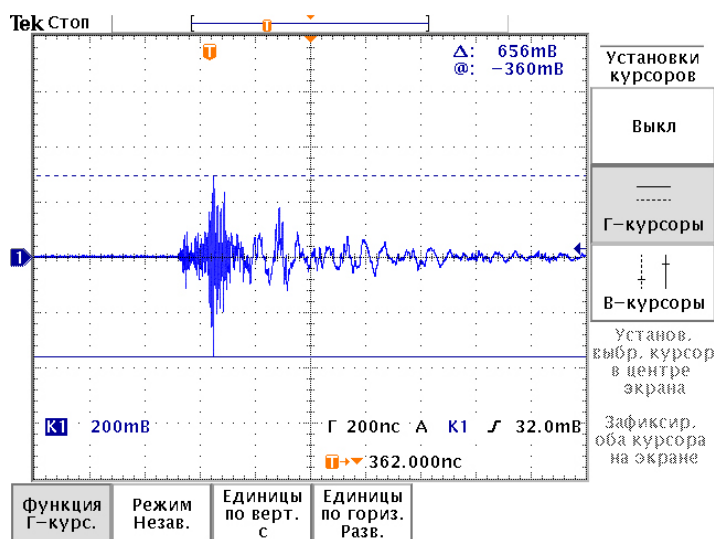


Рис. 5. Осциллограмма импульса помехи  
 Fig. 5. Oscillogram of the interference pulse

а в таблице 5 – параметры помех в двухпроводной линии ОИ.

#### 4. Исследование и анализ помех

Была использована схема формирования помех, приведенная на рис. 4 [5]. Расчет помех проводился по методике [7].

Осциллограмма импульса помехи от ИЭП приведена на рис. 5. На рис. 6 показан вид помехи от ГЭР.

Как видно из рис. 5 и 6, вид помехи от ИЭП похож на помеху от ГЭР. Параметры этих помех также близки. Это позволяет для анализа помех

от ИЭП и их расчета использовать в первом приближении математические выражения, которые ранее использовались для описания помех от ГЭР.

#### Заключение

Таким образом, предложенная методика испытательного воздействия на бортовую радиоэлектронную аппаратуру на базе вакуумной камеры обладает следующими свойствами:

- обеспечивает 4 степени жесткости испытаний;
- имеет удобное рабочее место для проведения испытаний;

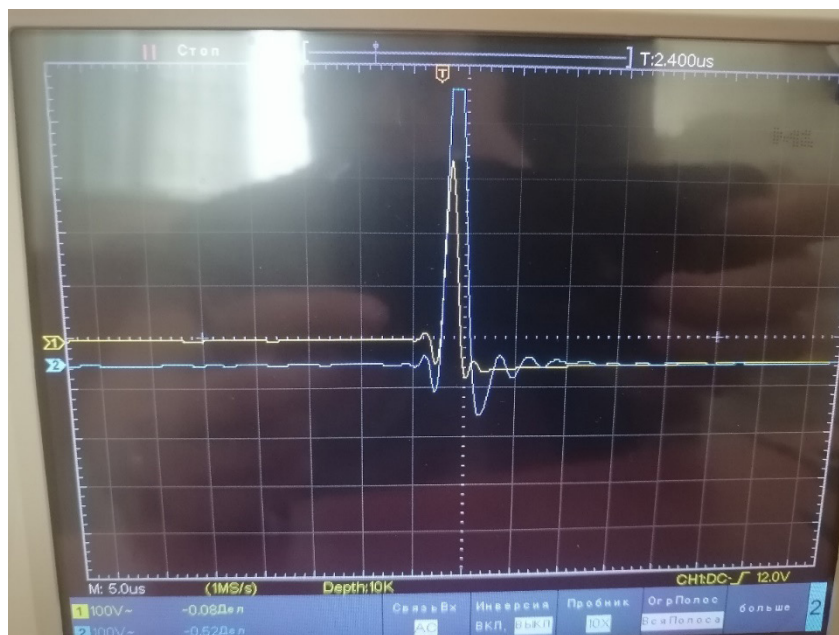


Рис. 6. Вид помехи от ГЭР

Fig. 6. Type of interference from GER

- дает возможность формирования испытательного воздействия в двух режимах: «электронного прожектора» и «сканирования»;
- формирует испытательное напряжение в диапазоне от 5 до 20 кВ; время воздействия на каждом ускоряющем напряжении составляет не менее 10 мин;
- формирует разрядный ток величиной до 30 мкА; энергия частиц электронов изменяется от 5 до 50 кэВ;
- создает рабочее давление в вакуумной камере до  $10^{-7}$  мм рт. ст.;

- методы и средства измерения параметров имитатора соответствуют общепринятым требованиям;

- обеспечивает поворот ОИ на угол от 0 до 270°;

- не оказывает электромагнитного воздействия на оператора и окружающее оборудование.

Методика и средства ее реализации соответствуют основным требованиям ГОСТ Р 51317.42-99 «Устойчивость к электростатическим разрядам» и может быть использована при наземных испытаниях бортовой аппаратуры КА [8].

### Список литературы

1. Наседкин А.В., Тюлевин С.В., Пиганов М.Н. Методика производственных испытаний электронных узлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. Т. 11, № 7 (38). С. 76–84. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20419629>
2. Куликов А.В. Методы контроля и измерений составных частей бортового радиотехнического комплекса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.32-39>
3. Быков А.П. Алгоритм проведения автономных испытаний радиоэлектронных средств // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104>
4. Костин А.В. Анализ теплового влияния двух внешних параллельных печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 4. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.38-47>
5. Костин А.В., Пиганов М.Н. Методика измерения помехи 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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-pomeh-v-tsepyah-bortovoy-apparatury-kosmicheskikh-apparatov-vyzvannyh-elektromagnitnym-polem-elektrostaticheskogo-ysclid=lwi348j2ys403509534>
6. Демидов А.А., Кудашов Е.В., Пиганов М.Н. Стенд для испытания бортовой аппаратуры на воздействие заряженных частиц // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всероссийской научно-технической конференции. 2022. С. 95–96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48549439>
7. Костин А.В., Пиганов М.Н. Расчет помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электростатическим разрядом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 4 (5). С. 1376–1379. URL: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_4\\_1376\\_1379.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_4_1376_1379.pdf)
8. ГОСТ Р 51317.42-99. Устойчивость к электростатическим разрядам. ИПК Издательство стандартов, 2000. 33 с.

## Информация об авторах

Демидов Алексей Алексеевич, аспирант кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: испытания бортовой аппаратуры для космических аппаратов.

E-mail: mlscompany@mail.ru

Пиганов Михаил Николаевич, профессор кафедры радиоэлектронных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: надежность бортовых радиоэлектронных устройств.

E-mail: kipres@ssau.ru

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2027, vol. 27, no. 2, pp. 69–76

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.2.69-76  
UDC 621.396+659  
Original Research

Received 29 January 2024  
Accepted 1 March 2024  
Published 29 June 2024

## On-board equipment testing procedure for the effects of electrostatic discharges


Alexey A. Demidov, Mikhail N. Piganov

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086, Russia

**Abstract – Background.** The relevance of the topic of this work is due to the need to improve the reliability and quality of the assessment of the stability of the onboard electronic equipment of spacecraft to electrostatic discharges. **Aim.** Investigation of the possibilities of using the electron flux in vacuum as a test effect on the spacecraft's on-board radioelectronic equipment in assessing its resistance to electrostatic discharges. **Methods.** Field experiment, research laboratory tests, modeling, mock-up, expert assessments. The article considers the conditions for the existence of an electronic stream in the «electronic spotlight» and «scanning» modes. A mock-up of an electronic device, which was previously used for testing in the atmosphere of air, was used as a test object. It has been structurally modified taking into account the dimensions, wiring diagram, tooling and electrophysical characteristics of the vacuum chamber. The modified layout is a first-level module with antennas located inside the housing. During the experiment, a vacuum meter, a kilovoltmeter, a digital oscilloscope with a bandwidth of 500 MHz, a high-voltage cable, a two-wire line, a hermetic plate, and an electron gun were used. The required vacuum was created using an automated pumping system. **Results.** The conditions for the existence of an electron flow in a vacuum chamber with a pressure of up to  $10^{-7}$  mm Hg have been experimentally established. The results of research tests of the radioelectronic module in the «electronic searchlight» and «scanning» modes have been obtained. The main types of interference from the action of electrostatic discharges are investigated. The analysis of the waveforms was carried out. Based on these results, a methodology has been developed for testing the onboard equipment of spacecraft for the effects of electrostatic discharges. The proposed method provides testing at a level of operating discharge current up to 30  $\mu$ A with particle energy from 5 to 50 keV. **Conclusion.** The test procedure and the means of its implementation comply with the basic requirements of GOST «Resistance to electrostatic discharges» and can be used for ground tests of spacecraft onboard equipment at four degrees of rigidity.

**Keywords** – electrostatic discharge; test exposure; on-board equipment; «electronic spotlight»; vacuum chamber; interference.

✉ kipres@ssau.ru (Mikhail N. Piganov)

 © Alexey A. Demidov, Mikhail N. Piganov, 2024

## References

1. A. V. Nasedkin, S. V. Tyulevin, and M. N. Piganov, “Method of production testing of electronic parts,” *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 7 (84), pp. 76–84, 2012, doi: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20419629>. (In Russ.)
2. A. V. Kulikov, “Methods of control and measurements of components of the onboard radio engineering complex,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 32–39, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.32-39>. (In Russ.)
3. A. P. Bykov, “Algorithm for conducting autonomous tests of radio electronic means,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 97–104, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.97-104>. (In Russ.)
4. A. V. Kostin, “Analysis of the thermal effect of two external parallel printed circuit board conductors set on a metal base and operating in a space vacuum on each other,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 38–47, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.38-47>. (In Russ.)
5. A. V. Kostin and M. N. Piganov, “Methodology for measuring interference in the circuits of on-board equipment of spacecraft caused by the electromagnetic field of an electrostatic discharge,” *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, vol. 17, no. 2 (4), pp. 804–810, 2015, url: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-pomeh-v-tsepyah-bortovoy-apparatury-komicheskikh-apparatury-vyzvannyh-elektromagnitnym-polem-elektrostaticheskogo?ysclid=lwi348j2ys403509534>. (In Russ.)

6. A. A. Demidov, E. V. Kudashov, and M. N. Piganov, "Stand for testing on-board equipment for the effects of charged particles," *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, pp. 95–96, 2022, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48549439>. (In Russ.)
7. A. V. Kostin and M. N. Piganov, "Calculation of interference in the circuits of on-board equipment of spacecraft caused by electrostatic discharge," *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, vol. 14, no. 4 (5), pp. 1376–1379, 2012, url: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_4\\_1376\\_1379.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_4_1376_1379.pdf). (In Russ.)
8. GOST R 51317.42-99. Resistance to electrostatic discharges. IPK Izdatel'stvo standartov, 2000. 33 p. (In Russ.)

### Information about the Authors

**Alexey A. Demidov**, postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

*Research interests:* testing of on-board equipment for spacecraft.

*E-mail:* mlscompany@mail.ru

**Mikhail N. Piganov**, professor of the Department of Radioelectronic Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

*Research interests:* reliability of on-board electronic devices.

*E-mail:* kipres@ssau.ru