

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Жуков П.А.^{1*}, Марченко М.В.^{1}, Кириллов В.Ю.^{2***}**

¹ *Московское опытно-конструкторское бюро «МАРС»,
1-й Шемиловский пер., 16, Москва, 127473, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: terran35@mail.ru*

*** e-mail: m-fallout@yandex.ru*

**** e-mail: kaf309@mai.ru*

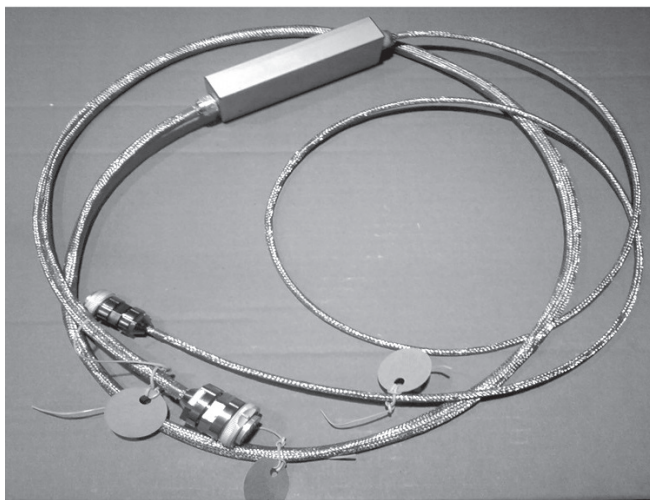
Рассмотрено влияние внешних факторов на эффективность экранирования бортовых кабелей летательных атмосферных и космических аппаратов. Приведены результаты исследований температурных и климатических воздействий на переходные сопротивления кабельных электрических соединителей. Представлены результаты испытаний эффективности экранирования при изменении переходных сопротивлений. Показана необходимость учета на этапе проектирования экранов бортовых кабелей влияния на их эффективность экранирования температурных и климатических факторов в течение жизненного цикла кабеля.

Ключевые слова: эффективность экранирования, бортовые кабели летательных атмосферных и космических аппаратов, переходное сопротивление, электрические соединители, жизненный цикл кабеля.

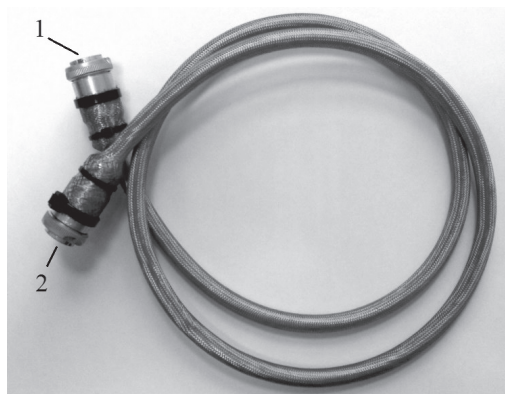
Атмосферные и космические летательные аппараты эксплуатируются в сложной электромагнитной обстановке. Для бесперебойного функционирования электронного оборудования бортовые кабели защищают от помех с помощью электромагнитных экранов, изготавливаемых по различным технологиям и из различных материалов [1–3]. Идеальным вариантом экрана является сплошной металлический корпус для блоков оборудования и сплошные металлические трубчатые экраны для бортовых кабелей. На практике для уменьшения массы и придания гибкости кабели покрывают плетеными

экранами с различными параметрами плетения (рис. 1) [9]. Гибкие плетеные экраны являются менее эффективными, но более технологичными [4, 6]. На рис. 1 приведены примеры бортовых экранированных кабелей с плетеными электромагнитными экранами.

Электромагнитные экраны кабелей имеют неоднородности в виде разрывов и нарушений структуры. Неоднородности электромагнитного экрана возникают на участках поверхностей при соединении: экрана кабеля и кожуха кабельного электрического соединителя; кожуха электрического соеди-



а)



б)

Рис. 1. Кабели бортовой сети с плетеными экранами: а — кабель бортовой сети космического аппарата с блоком устройства трансформаторной развязки; б — образец №1 кабеля, использованный при проведении климатических испытаний (1 — X1; 2 — X2 электрические кабельные соединители)

нителя с корпусом соединителя; кабельного электрического соединителя и его ответной части; электрического соединителя и корпуса бортового прибора (рис. 2). Переходные сопротивления между различными неоднородными участками экранов кабелей и электрических соединителей влияют на

эффективность экрана [2]. Высокая эффективность экранирования может быть обеспечена только при минимальных значениях переходных сопротивлений. Максимальная допустимая величина переходных сопротивлений задана [4] и составляет 2 мОм.

Для измерения переходных сопротивлений бортовых кабельных сетей применяются электронные миллиомметры со специальными измерительными клещами, работающие по четырехпроводной измерительной схеме. Измерительные клещи для проведения измерений подключаются к экрану и электрическому соединителю кабеля (рис. 3).

Величина переходного сопротивления не является постоянной [6, 7] и может значительно изменяться в процессе жизненного цикла изделия под воздействием различных факторов: способы крепления и соединения экранов и корпусов; температурные и климатические факторы; условия эксплуатации. Все эти факторы могут приводить как к постепенным, так и к резким увеличениям переходных сопротивлений, что может значительно уменьшить эффективность экранирования и соответственно увеличить уровень наведенных электромагнитных помех в виде токов и напряжений на внутренних проводниках до опасных значений, при воздействии электромагнитных полей

Эксперименты по исследованию воздействия влажного теплого воздуха в климатической камере на экранированные кабели, а также последовательное охлаждение и нагревание кабельного соединителя показали значительные изменения переходного сопротивления.

В процессе эксперимента, имитирующего пребывание в тропическом климате, были испытаны два образца, защищенные плетеным экраном, выполненным из медно-ниобиевой проволоки. Первый образец имел однослойный экран (см. рис. 1, б), второй — двухслойный медно-ниобиевый плетеный экран. Оба образца были подвержены воздействию воздуха температурой 60°C и влажностью 95% в

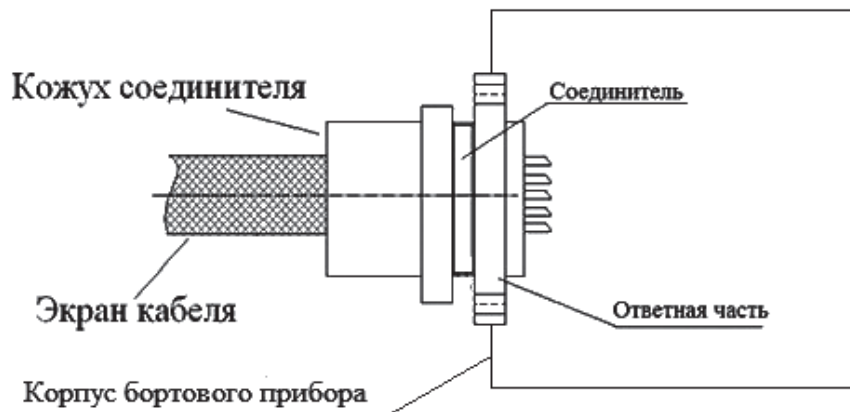


Рис. 2. Схема соединения экрана кабеля с электрическим кабельным соединителем

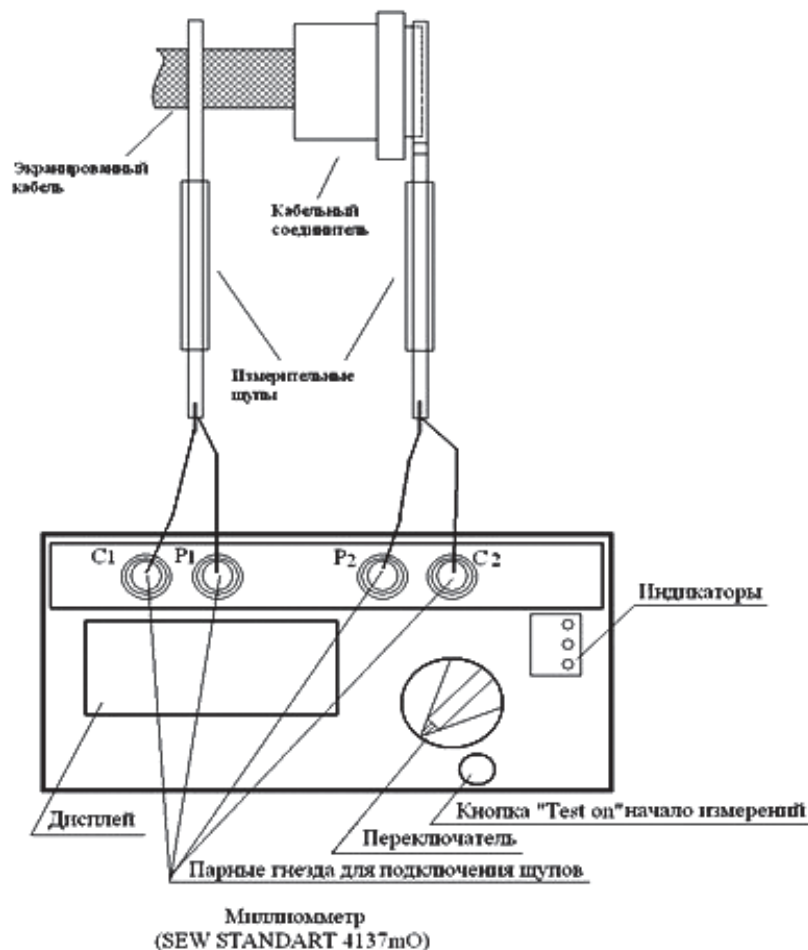


Рис. 3. Схема измерения переходного сопротивления с помощью миллиомметра

климатической камере в течение 5 суток. Значения переходных сопротивлений каждого из электрических соединителей исследованных кабелей приведены в табл. 1.

Как следует из таблицы, переходное сопротивление соединителя X2 возросло в 5,5 раз, а в случае с соединителем X1 второго образца произошло значительное увеличение — в 26 раз. Результаты данного эксперимента показывают, что при климатических воздействиях тепла и влаги возможны резкие увеличения переходных сопротивлений.

В эксперименте на воздействие температурных колебаний три образца электрических соединителей кабелей подвергались термоудару посредством погружения в жидкий азот с последующим прогревом до 290°C потоком горячего воздуха. Переходное сопротивление измерялось перед началом эк-

сперимента и на каждом его этапе: в охлажденном состоянии изделия; в горячем состоянии; через фиксированное время $t = 30$ мин после окончания эксперимента.

Как показывают результаты эксперимента, приведенные в табл. 2, переходное сопротивление нагретого соединителя более чем в шесть раз превышает переходное сопротивление того же соединителя при нормальных условиях.

Во всех экспериментах наблюдаются значительные изменения переходных сопротивлений. При этом видно, что после окончания эксперимента переходные сопротивления не возвращаются к прежним значениям. Причинами этого являются остаточные деформации формы деталей из-за термических расширений и сжатий материалов, наруше-

Таблица 1

Изменение переходных сопротивлений кабельных соединителей под воздействием климатических факторов

Соединитель	Переходное сопротивление $R_{пер}$, мОм			
	Первый образец		Второй образец	
	Перед испытанием	После испытания	Перед испытанием	После испытания
X1	1,45	1,6	1	26
X2	1,45	8	1	8,5

Таблица 2

Изменение значений переходных сопротивлений при испытании на термоудар

Этап эксперимента	Переходное сопротивление $R_{пер}$, мОм		
	Первый образец	Второй образец	Третий образец
Перед экспериментом	0,9	0,3	0,1
При нагреве до 290°С	6	6,2	5,5
После охлаждения в жидком азоте	0,2	0	0
Через 30 минут после окончания эксперимента	1	0,8	0,5

ние контакта деталей из-за появления окисленного слоя. Подобным воздействиям кабели подвергаются в течение всего жизненного цикла кабельной сети — при монтаже, в процессе сборки летательных и космических аппаратов, хранении на складах, транспортировке и при эксплуатации.

Для оценки влияния переходного сопротивления на эффективность экранирования проводились испытания бортовых кабелей с различными переходными сопротивлениями. Эффективность экранирования оценивалась сравнением уровней напряжений, наведенных на внутренние проводники, при воздействии электростатических разрядов (ЭСР) на электромагнитные экраны бортовых кабелей [7].

Для исследования влияния величины переходного сопротивления на уровень наводимого напряжения помех на экранированный кабель производилось воздействие электростатическим разрядом до 20 кВ [5, 8]. ЭСР вызывает импульсный ток на заземленном электропроводном экране кабеля,

который, проходя по экрану, наводит кондуктивные помехи в виде напряжений и токов на внутренних проводниках кабеля. Как показывают результаты исследований, величина переходного сопротивления между экраном и электрическим соединителем существенно влияет на уровни наводимых напряжений на внутренних проводниках и, соответственно, на нагрузку подключенного к кабелю имитатора бортового прибора.

Экспериментально было исследовано девять образцов бортовых кабелей с различными величинами переходных сопротивлений. Каждый образец подвергался воздействию электростатических разрядов на различные участки испытательного стенда и экраны кабелей: пластина заземления; корпус имитатора бортового прибора; центральная часть экрана кабеля. По полученным результатам измерений наведенных на внутренних проводниках кабелей амплитудных значений напряжений составлена диаграмма (рис. 4). Приведенная диаграмма

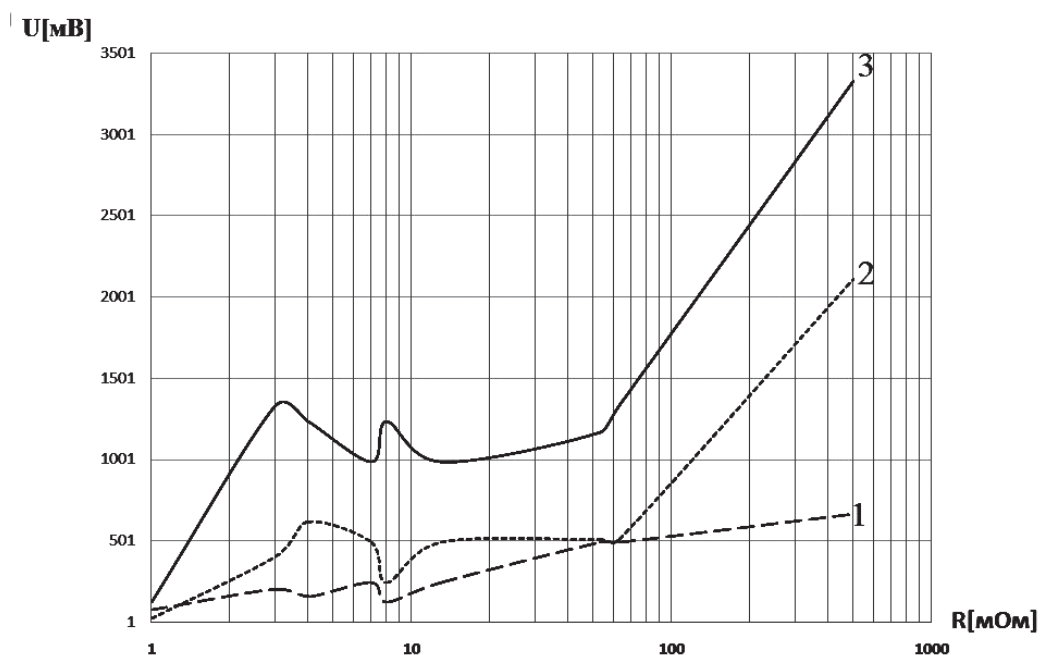


Рис. 4. Диаграмма зависимости наведенных на внутренних проводниках амплитудных значений напряжений от величин переходных сопротивлений. Электростатический разряд: 1— в пластину заземления; 2— в корпус имитатора бортового прибора; 3— в центральную часть экрана кабеля

иллюстрирует зависимость амплитудных значений наведенных на внутренних проводниках напряжений от величин переходного сопротивления.

Из диаграммы следует, что при увеличении переходного сопротивления возрастает амплитудное значение наведенных импульсных напряжений на внутренних проводниках экранированных бортовых кабелей. В случае воздействия электростатического разряда в центральную часть экрана кабеля при увеличении переходного сопротивления с 1 МОм до 3 МОм амплитудное значение наведенного напряжения возрастает до 1417 мВ.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что воздействие температурных и климатических факторов на электромагнитные экраны и электрические соединители бортовых кабелей летательных аппаратов приводит к увеличению переходных сопротивлений, что уменьшает эффективность экранирования бортовых кабелей. Поэтому при проектировании кабелей, при расчете и/или выборе параметров плетеных экранов на основе заданной в соответствии с техническими условиями эффективности экранирования необходимо учитывать ее уменьшение от воздействия температурных и климатических факторов в процессе жизненного цикла изделия.

Библиографический список

1. Гроднев И.И., Сергейчук К.Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. — М.: Связьиздат, 1960. — 316 с.
2. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Исследование экранирующих свойств гибких материалов с целью их дальнейшего применения для защиты изделий аэрокосмической техники от электромагнитных воздействий // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18. №1. С. 121-125.
3. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155-160.
4. Жегов Н.А., Кириллов В.Ю., Клыкков А.В., Томилин М.М. Сравнение расчётных и экспериментальных частотных характеристик эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 142-148.
5. ГОСТ 19005-81. Средства обеспечения защиты изделий ракетной и ракетно-космической техники от статического электричества. Общие требования к металлизации и заземлению. Введ. 07.01.1982. — М.: Изд-во стандартов, 1993. Переиздание с изменениями. — 38 с.
6. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 178 с.
7. Кириллов В.Ю., Марченко М.В. Зависимость эффективности экранирования кабелей от переходного сопротивления при воздействии электростатического разряда // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 1. С. 10-14.
8. ГОСТ Р 51317.4.2-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. Введ. 24.12.1999. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 20 с.
9. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кузюкин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 768 с.

TRANSITION RESISTANCE EFFECT ON AIRCRAFT AND SPACECRAFT ONBOARD CABLE NETWORK SHIELDING EFFICIENCY

Zhukov P.A.^{1*}, Marchenko M.V.^{1**}, Kirillov V.Yu.^{2***}

¹ Moscow Experimental Design Bureau "Mars",
16, 1st Shemilovskiy lane, Moscow, 127473, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: terran35@mail.ru

** e-mail: m-fallout@yandex.ru

*** e-mail: kaf309@mai.ru

Abstract

To ensure the specified shielding efficiency electromagnetic screen should be homogenous to the maximum.

The uniformity of the shield depends on the resistance between the cable shield, the electrical connector and the onboard device case, i. e. transition

resistances. High shielding efficiency can be ensured with small values of transition resistances.

The transition resistance is not a constant and can vary significantly during the life cycle of a product. These variations are caused by the effect of various factors: shields and cases bonding and connecting techniques; temperature and environmental conditions; operating conditions.

The results of the experiment that simulating a stay in a tropical climate revealed, that the magnitude of the transition resistance has increased up to 8 mOm, and in some cases it increased from 1 to 26 mOm, which significantly exceeds the standard value.

While temperature fluctuations effect testing, cable connectors subjected to thermal shock by immersion in liquid nitrogen with subsequent heating to 290°C by the stream of hot air. The results of this experiment demonstrate, that the transition resistance of the heated connector increases from 1 to 6 mOm.

In all these experiments, significant changes of transition resistances values in the direction to increase without returning to the initial values were observed. The reason for this consists in the thermal deformation of the parts' shape and contact failure due to the emergence of the oxidized layer.

The results of the shielding effectiveness study show that the magnitude of the transition resistance affects significantly the levels of induced interference voltage at the load, connected to the onboard instrument simulator cable.

Transient resistance value increasing reduces the onboard cables shielding efficiency. Thus, while electromagnetic shields designing, it is necessary to account for in shielding efficiency decrease on exposure to thermal and climatic factors during the life cycle of the product.

Keywords: shielding efficiency, aircraft and spacecraft onboard cables, transient resistance, electrical connectors, cable life cycle.

References

1. Grodnev I.I., Sergeichuk K.Ya. *Ekranirovanie apparatury i kabelei svyazi* (Shielding of equipment and cables), Moscow, Svyaz'izdat, 1960, 316 p.
2. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 121-125.
3. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsonnaya tekhnika*, 2016, no. 4, pp. 155-160.
4. Zhegov N.A., Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Tomilin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 142-148.
5. *Sredstva obespecheniya zashchity izdelii raketnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki ot staticheskogo elektrichestva. Obshchie trebovaniya k metallizatsii i zazemleniyu. GOST 19005-81, 07.01.1982* (Means of ensuring protection of products of rocket and space equipment from static electricity. General requirements to the metallization and earthing. State Standart 19005-81), Moscow, Standarty, 1993, 38 p.
6. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya sovместimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of onboard cable network of the aircraft), Moscow, MAI, 2014, 178 p.
7. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovместimosti*, 2012, no. 1, pp. 10-14.
8. *Sovместimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ustoichivost' k elektrostaticheskim razryadam. Trebovaniya i metody ispytaniy. GOST R 51317.4.2-99, 24.12.1999* (Compatibility of technical equipment. Resistance to electrostatic discharge. Requirements and test methods. State Standart R 51317.4.2-99, 24.12.1999), Moscow, Standarty, 2000, 20 p.
9. D'yakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K., Kuzhekin I.P., Zhukov A.V. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* (Electromagnetic compatibility in power industry and electrical engineering), Moscow, Energoatomizdat, 2003, 768 p.