

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. И. Горностаев

*АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация*

Важным этапом при разработке интерфейсных модулей контроля температур для измерительных приборов, реализуемых по магистрально-модульному принципу построения на базе центрального приборного модуля и используемых в составе измерительной системы на космических аппаратах различного назначения, является обеспечение их помехоустойчивой работы при воздействии на измерительную систему совокупности различных видов помех, которые определяют электромагнитную обстановку на космическом аппарате. Статья посвящена анализу характеристик воздействующих на измерительную систему различных видов помех, выявлению путей их проникновения в интерфейсный модуль контроля температур и определению влияния характеристик этих помех на выбор мер по обеспечению требуемой помехоустойчивости интерфейсного модуля контроля температур в составе измерительного прибора. Показано, что пути проникновения помех в интерфейсный модуль контроля температур зависят от частотных и временных характеристик действующих на измерительную систему помех. Меры по ослаблению этих помех необходимо определять после оценки опасности их проникновения в интерфейсный модуль контроля температур по каждому пути отдельно во всем частотном диапазоне их воздействия. По результатам таких оценок следует определять комплекс обоснованных мер по обеспечению помехоустойчивости интерфейсного модуля контроля температур в составе измерительного прибора, реализуемых в совокупности на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и интерфейсного модуля контроля температур.

Ключевые слова: космический аппарат, измерительный прибор, контроль температуры, термопреобразователь сопротивления, электромагнитное поле, помехоустойчивость, ослабление помех.

Введение

В измерительных системах современных космических аппаратов (КА) широко используются измерительные приборы, в основу построения которых положен магистрально-модульный принцип на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) с последовательным периферийным интерфейсом (ППИ) [1; 2]. Для таких приборов, в которых предусмотрена функция контроля и измерения температуры на большом числе элементов КА (приборах, узлах конструкции и т. п.), ведутся разработки различных модификаций многоканальных интерфейсных модулей контроля температур (ИМКТ). Одним из важнейших этапов раз-

работки таких модулей является обеспечение их помехоустойчивой работы в составе измерительного прибора, позволяющей при воздействии на измерительную систему совокупности различных видов помех, определяющих электромагнитную обстановку (ЭМО) на КА, сохранить погрешность измерения в пределах допустимых норм.

Измерительная система, предназначенная для контроля и измерения температуры на элементах КА, включает в себя:

- внешние по отношению к измерительному прибору термопреобразователи сопротивления (ТС), устанавливаемые на элементах КА, измерительные кабели, соединяющие выходные цепи ТС к входным цепям каналов измерения ИМКТ, и кабель питания, используемый для подачи на измерительный прибор бортового напряжения от системы электропитания (СЭП);

✉ galiv@iss-reshetnev.ru

• внутренние в измерительном приборе функциональные узлы – ИМКТ, ЦПМ и модуль питания (МП), с помощью которых осуществляется измерение уровней сигналов на входных цепях каналов измерения, аналого-цифровое преобразование результатов измерения и их цифровая обработка.

В такой измерительной системе при отсутствии воздействия на нее различных видов помех в формировании общей погрешности измерения участвуют только составляющие основной погрешности измерения всех звеньев тракта преобразования, вносимые ТС, сопротивлениями проводов линий связи в измерительных кабелях и в ИМКТ многоканальной схемой измерения (МСИ) и аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [3].

Однако проникновение помех в любое звено тракта преобразования измерительной системы, если не будут приняты специальные меры по их ослаблению, приведет к возникновению дополнительной погрешности измерения, которая может вызвать недопустимое увеличение общей погрешности измерения, а в отдельных случаях и полную потерю работоспособности ИМКТ. Проблема состоит в том, на каких участках составных частей измерительной системы необходимо принимать такие меры и каким образом осуществлять их реализацию.

Сложность проблемы связана с тем, что источники помех и пути их прохождения до отдельных составных частей измерительной системы распределены в пространстве КА. Воздействие помех происходит в различных частотных и временных диапазонах, момент и факт их появления часто является случайной и неконтролируемой величиной, а местонахождение источников помех заранее неизвестно. Для контроля сложившейся ЭМО на КА возможно использование специальной аппаратуры, позволяющей регистрировать параметры помех в различных точках пространства КА и выявлять наиболее мощные источники

помех, но даже при наличии такой аппаратуры учесть эти результаты контроля возможно только на более поздних этапах проектирования измерительной системы [4; 5]. Кроме того, определение параметров устройств, позволяющих обеспечить необходимое снижение уровня помех в каждом из звеньев тракта преобразования измерительной системы, должно опираться на строгие математические расчеты, что в условиях неопределенности часто приходится делать без достаточного обоснования.

1. Постановка задачи

Рассмотрим измерительную систему (рис. 1), содержащую в своем составе N термопреобразователей сопротивления $ТС_1-ТС_N$, N измерительных кабелей, кабель питания (наличие других кабелей, используемых для связи с прибором, для упрощения задачи не будем рассматривать) и функциональные узлы измерительного прибора – многоканальный ИМКТ, ЦПМ и МП.

Термопреобразователи сопротивления $ТС_1-ТС_N$ размещены на элементах КА для контроля на их поверхностях температур T_1-T_N . Все токопроводящие части конструкции корпуса измерительного прибора и корпусов рамок функциональных узлов соединены гальванически. Внешние (бортовые) кабели измерительного прибора и чувствительные элементы (ЧЭ) ТС экранированы, а внутренние (межмодульные) кабели, размещенные под крышками измерительного прибора, могут быть неэкранированными, экранированными или частично экранированными исходя из особенностей передаваемых сигналов [6].

На такую измерительную систему воздействуют различные виды внешних помех, излучаемых непрерывно в виде электромагнитных полей в процессе работы бортовой аппаратурой (БА) и бортовой кабельной сетью (БКС) и импульсно при электростатических разрядах (ЭСР) на электри-

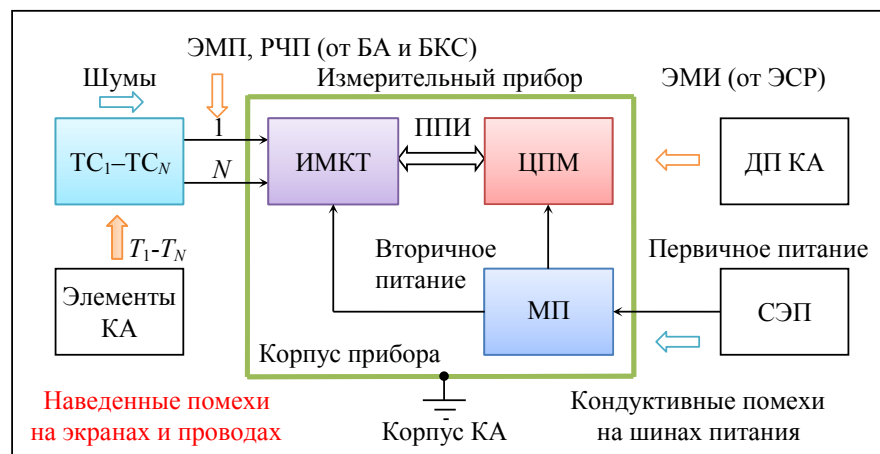


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы с указанием воздействующих на нее различных видов помех в сложившейся ЭМО на КА

зуемых диэлектрических поверхностях (ДП) КА, а также возникающих в процессе работы на бортовых шинах системы электропитания (СЭП) и на ЧЭ ТС. Эти помехи в совокупности определяют ЭМО на КА и вызывают образование наведенных помех на электрических цепях измерительной системы, подверженных их воздействию.

В условиях сложившейся ЭМО на КА на измерительную систему могут воздействовать следующие виды помех:

- электромагнитные помехи (ЭМП), вызванные работой энергоемкой БА, непрерывно излучающей в пространство КА напрямую и через кабели БКС значительную часть своей энергии с неравномерным спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;
- радиочастотные помехи (РЧП), вызванные работой передающей радиосигналы БА, периодически излучающей в пространство КА напрямую и через кабели БКС значительную часть своей энергии на высоких частотах с относительно узким спектром в радиочастотном диапазоне;
- помехи, вызванные ЭСР на электризуемых ДП КА, приводящими к кратковременному растеканию импульсных токов разряда по поверхностям корпуса КА, корпусов БА и электростатических экранов и излучению в пространство КА мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) энергии с широким спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;
- кондуктивные помехи на бортовых шинах СЭП, вызванные изменением режимов работы СЭП в процессе эксплуатации КА, приводящим к пульсациям и скачкообразным изменениям напряжения питания с неравномерным спектром в низкочастотном и высокочастотном диапазонах;
- шумы на ЧЭ ТС, вызванные флуктуациями протекающего через них измерительного тока, приводящими к хаотическому изменению напряжения на выводах ТС с широким энергетическим спектром в низкочастотном диапазоне.

Измерительная система должна удовлетворять требованиям по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) с ЭМО на КА [7]. Поэтому на КА с учетом требований по обеспечению ЭМС предусматривают общие меры по ослаблению действующей на измерительную систему совокупности помех:

- корпус измерительного прибора используют в качестве электростатического экрана (его изготавливают, как правило, из электропроводящих материалов или покрывают ими с целью металлизации) и соединяют с корпусом КА;
- кабель питания и измерительные кабели помещают в электропроводящие оплетки, которые также используют в качестве электростатических экранов и соединяют с корпусом КА через корпус измерительного прибора;

- установленные на элементах КА термопреобразователями сопротивления $ТС_1$ – $ТС_N$ закрывают локальными электростатическими экранами, которые соединяют с экранами измерительных кабелей.

Также выполняют необходимые подключения шин первичного питания на выходе СЭП и шин вторичного питания на выходе МП в измерительном приборе (на рис. не показано):

- отрицательный вывод бортовых шин СЭП для исключения возникновения плавающих потенциалов заземляют на корпус КА;
- выходные шины МП, используемые в измерительном приборе для питания аналоговых и цифровых микросхем ИМКТ, для уменьшения уровня проходных помех гальванически развязывают от бортовых шин СЭП (обычно используют трансформаторную развязку);
- отрицательные токоведущие выводы термопреобразователей сопротивления $ТС_1$ – $ТС_N$ подключают к отрицательному выводу выходных шин МП (общая шина питания ИМКТ) через токоведущие линии связи N измерительных кабелей и общие в каналах измерения ИМКТ входные цепи.

При наличии в ПМ гальванической развязки первичных и вторичных шин питания общая вторичная шина питания остается с плавающим потенциалом. Учитывая эту особенность, в ПМ включают высокоомный резистор (~ 100 кОм) между корпусом измерительного прибора и общей вторичной шиной питания.

Кроме того, в дополнение к перечисленным мерам измерительный прибор размещают в области пространства КА с меньшим уровнем воздействия помех.

Однако предусмотренных общих мер по ослаблению действующей совокупности помех в сложившейся ЭМО на КА для измерительной системы оказывается недостаточным из-за недостаточной эффективности экранирования электростатических экранов, используемых для защиты от воздействия электрических полей, и наличием в измерительной системе источников кондуктивных помех, действующих на провода линий связи измерительных кабелей и кабелей питания. Необходимо предусмотреть дополнительные меры по ослаблению действующей совокупности помех, которые бы позволили обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора.

При определении дополнительных мер следует исходить из условия, что воздействие помех на измерительную систему не должно приводить к ухудшению качества функционирования ИМКТ (недопустимое увеличение погрешности измерения, сбой в информационных и управляющих сигналах) в пределах значений норм параметров помех, заданных в технических требованиях на

измерительный прибор для соответствующих частотных и временных диапазонов. В отдельных случаях при воздействии на измерительную систему одиночных импульсных помех допускается временное ухудшение функциональных характеристик измерительного прибора, если это время оговорено в технических требованиях. После прекращения воздействия импульсной помехи нормальное функционирование измерительного прибора должно автоматически восстанавливаться.

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать характеристики действующих на измерительную систему помех, определить возможные пути проникновения этих помех в ИМКТ, оценить опасность их проникновения в заданных частотных и временных диапазонах и на основе проведенного анализа определить обоснованные дополнительные меры по их ослаблению, позволяющие обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора.

2. Анализ характеристик действующих на измерительную систему помех и определение путей их проникновения в ИМКТ

Характеристики перечисленных видов помех, воздействующих на измерительную систему, определяются используемым в составе КА бортовым оборудованием, которое имеет свойство в процессе эксплуатации при определенных условиях излучать в пространство КА электромагнитную энергию в различных частотных и временных диапазонах.

Для определения путей проникновения помех в ИМКТ в составе измерительного прибора, от которых зависит выбор средств защиты от их воздействия, необходимо проанализировать, в каких диапазонах генерируются бортовым оборудованием каждый из перечисленных видов помех и на какие составные части измерительной системы направлено их воздействие. Без проведения такого анализа не очевидно, каким образом должна быть организована защита ИМКТ от их воздействия. Защита каждого активного элемента электронной схемы ИМКТ от воздействия помех с использованием, например, фильтров вызовет необоснованное увеличение массогабаритных показателей измерительного прибора, что недопустимо.

Поэтому важно найти комплексное решение, которое бы предусматривало для обеспечения требуемой помехоустойчивости ИМКТ принятие обоснованных защитных мер во всех составных частях измерительной системы и позволило бы минимизировать массогабаритные показатели измерительного прибора. Однако это возможно после детального изучения особенностей воз-

действия на измерительную систему каждого из перечисленных видов помех и проведения оценки опасности их проникновения в ИМКТ. Далее рассмотрим эти особенности более подробно.

Воздействие ЭМП

Наличие ЭМП на КА прежде всего связывают с работой электроэнергетического и электронного оборудования, непрерывно излучающего часть своей энергии в открытое пространство КА в виде электромагнитных волн, причиной которых могут быть генераторы, преобразователи, линии передачи электроэнергии, средства распределения, цифровые устройства БА. Частотный спектр таких помех широкий (захватывает низкочастотный и высокочастотный диапазоны) и как правило неравномерный (на отдельных участках диапазона выделяется спектр узкополосных помех с преобладающими частотными составляющими, определяемыми работой отдельных устройств). Допустимые нормы на уровни ЭМП, действующих в заданной области пространства КА, приводятся в технических требованиях к БА и задаются в пределах частотного диапазона от 1 МГц до 18 ГГц.

В указанном частотном диапазоне влиянию ЭМП подвержены все составные части измерительной системы – ТС, измерительные кабели, кабель питания и измерительный прибор. Наличие в них общих электростатических экранов не обеспечивает полную защиту от воздействия ЭМП. Из-за недостаточной эффективности их экранирования электромагнитное поле проникает сквозь экраны и воздействует в ослабленном виде на ЧЭ ТС, провода линий связи измерительных кабелей и бортовых шин кабеля питания, а также на электрические цепи функциональных узлов измерительного прибора, вызывая в них наводки напряжений и токов помех.

Нижняя граница диапазона воздействия ЭМП находится за пределами полосы пропускания ИМКТ (учитывая большую инерционность изменения температуры на поверхностях элементов КА, полосу пропускания ограничивают низкочастотными фильтрами ~ до 1 кГц) и высокочастотные помехи должны бы быть в ИМКТ отфильтрованы. Тем не менее эти помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены и перенесены в область более низких частот вследствие нелинейных характеристик диодов и транзисторов, используемых в МСИ ИМКТ и внутри микросхем, и попасть в полосу пропускания ИМКТ.

При воздействии ЭМП на измерительную систему внешнее электромагнитное поле наибольшее влияние оказывает на провода линий связи измерительных кабелей из-за большой их длины, поэтому для уменьшения такого влияния, учитывая высокую чувствительность МСИ ИМКТ, может потребоваться введение в измерительные кабе-

ли дополнительных электростатических экранов, обеспечивающих защиту проводов линий связи от воздействия ЭМП во всем частотном диапазоне. Влияние электромагнитного поля на кабель питания менее существенно из-за низкого импеданса цепей прохождения помех, поэтому в кабеле питания к дополнительным защитным мерам от воздействия ЭМП не прибегают, ограничиваются лишь фильтрацией помех в измерительном приборе во внутренних цепях МП.

При оценке влияния электромагнитного поля на провода линий связи измерительных кабелей следует учитывать, что эффективность экранирования зависит от длины волны λ излучения (связана с частотой излучения соотношением $f = c/\lambda$, где c – скорость света в вакууме) и от расстояния x от источника до приемника помех. Влияние электромагнитного поля при $x < \lambda/2\pi$ (ближнее поле) происходит через емкостную связь (поле E) и индуктивную связь (поле H), а при $x > \lambda/2\pi$ (дальнее поле) происходит через электромагнитную связь (поля E и H). С ростом частоты излучения за счет емкостной и индуктивной связей в измерительных кабелях увеличивается взаимовлияние между проводами, поэтому на высоких частотах для уменьшения взаимовлияния наряду с дополнительным экранированием может потребоваться и повив проводов.

Необходимо также учитывать, что для обеспечения полного экранирования составных частей измерительной системы от ЭМП на высоких частотах все электростатические экраны не должны иметь каких-либо вырезов (отверстий или щелей), размеры которых превышают $\lambda/2$. Однако на практике это условие из-за ряда конструктивных ограничений не всегда возможно выполнить. В результате в измерительной системе ЭМП воздействуют не только на провода линий связи измерительных кабелей, но и на внутренние цепи функциональных узлов измерительного прибора через зазоры в конструкции его корпуса, что также приводит к проникновению помех в ИМКТ. В этом случае может потребоваться введение в ИМКТ специальных схмотехнических или конструктивных способов защиты от помех.

Воздействие РЧП

РЧП на КА вызваны работой радиоэлектронной аппаратуры, периодически излучающей часть своей энергии в открытое пространство КА в виде электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне, источником которых могут быть передатчики навигационных сигналов, средства радиосвязи, радиорелейные линии. Такая аппаратура обеспечивает передачу сигналов в радиочастотном диапазоне (обычно в пределах от 300 МГц до 30 ГГц) на несущих частотах модулированных высокочастотных сигналов с относительно узким частотным спектром, ширина которых определя-

ется частотой модуляции. Частотный спектр РЧП, воздействующих на измерительную систему, находится далеко за пределами полосы пропускания ИМКТ, тем не менее проникновение их в ИМКТ может оказаться нежелательным из-за наличия в спектре передаваемых высокочастотных сигналов модуляционных составляющих.

Вследствие электромагнитной индукции в измерительной системе нежелательному воздействию РЧП подвержены все электрические цепи, связанные с ИМКТ через измерительные кабели, кабель питания и корпус измерительного прибора. Однако и в этом случае внешнее электромагнитное поле наибольшее влияние оказывает на провода линий связи измерительных кабелей, которые из-за большой длины могут выступать в роли радиоантенн. Внешнее электромагнитное поле генерирует в проводах токи, которые могут перемещаться по таким антеннам. Эти токи при прохождении через входные цепи каналов измерения ИМКТ вступают во взаимодействие с усилителем МСИ и могут переводиться в низкочастотные демодулированные сигналы, попадающие в полосу пропускания ИМКТ. Демодуляция проявляется в наложении на полезный сигнал нежелательных низкочастотных модуляционных составляющих сигналов, что вызывает появление на выходе усилителя МСИ постоянного смещения напряжения. В этом случае также может потребоваться введение дополнительных электростатических экранов в измерительные кабели, что позволит обеспечить протекание генерируемых токов в экранах, а не в проводах линий связи, и повив проводов, что позволит уменьшить взаимовлияние между проводами.

Электромагнитное поле, проникающее через зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора, может генерировать токи и в тестовых выводах ИМКТ, которые также могут вступать во взаимодействие с усилителем МСИ и привести к появлению на его выходе постоянного смещения напряжения, вызванного выпрямленными токами. В таком случае может потребоваться введение в высокочувствительные цепи ИМКТ радиочастотных фильтров или использование специальной экранирующей конструкции, которые мешают демодуляции нежелательных низкочастотных сигналов.

Воздействие помех, вызванных ЭСР

В создании ЭМО на КА особую роль играют процессы электризации ДП КА под воздействием электронов и ионов окружающей плазмы. В процессе электризации происходит так называемая дифференциальная зарядка ДП, в результате которой между ними возникает значительный градиент потенциала, при котором происходят ЭСР. Параметры ЭСР характеризуются по ГОСТ Р 56515-2015 следующими максимальными

значениями: максимальное напряжение разряда 20 кВ, амплитуда импульса тока разряда до 100 А с длительностью фронта от 10^{-9} до 10^{-7} с [8]. ЭСР могут быть одиночными и периодическими (с частотой появления до 50 Гц в течение нескольких секунд). Напряженность поля вблизи канала ЭСР может достигать до 200 кВ/м. Требования по защищенности и стойкости к воздействию статического электричества к БА, на которую возможно воздействие ЭСР с внешних ДП КА, приводят в технических заданиях на их разработку и устанавливаются согласно п. 8.6 ГОСТ Р 56515-2015.

Проблеме обеспечения стойкости БА к воздействию ЭСР и создания методологии проектирования БА с учетом воздействия поражающих факторов электризации посвящено ряд диссертационных работ [9–11]. На основании результатов проведенных исследований предложены рекомендации по применению методов защиты БА от помех ЭСР и алгоритм разработки мер комплексной защиты БА от помех в БКС, вызванных ЭСР [12; 13]. Рекомендации носят обобщенный характер и применительно к рассматриваемой измерительной системе ориентируют разработчика на проведение анализа особенностей эксплуатации всех составных частей измерительной системы – ТС, измерительных кабелей, кабеля питания и внутренних функциональных узлов измерительного прибора и проведению теоретической оценки их стойкости к факторам ЭСР, а затем определению необходимости и достаточности принимаемых мер по их защите от помех ЭСР. Рассмотрим эти особенности более подробно.

ЭСР на КА могут возникать как между соседними электризуемыми ДП, которые не являются частями рассматриваемой измерительной системы, так и между ними и корпусом измерительного прибора, или локальными экранами элементов КА, или экранами измерительных кабелей и кабелей питания. Условно их называют непрямыми ЭСР и прямыми ЭСР соответственно. Непрямые ЭСР воздействует на измерительную систему посредством излучения в пространство КА импульсных электромагнитных полей, а прямые ЭСР – посредством растекания импульсных токов разряда по поверхностям корпуса измерительного прибора, локальных экранов элементов КА и экранов кабелей, гальванически связанных с корпусом КА.

С позиций ЭМС непрямые и прямые ЭСР на КА являются источником излучения опасных импульсных ЭМП (ЭМИ) большой энергии с широким частотным спектром (перекрывает низкочастотный и высокочастотный диапазоны), воздействующих не только на бортовые системы в целом, но и на отдельные элементы и устройства БА. Большая часть энергии ЭМИ при возникновении ЭСР (до 90 %) сосредоточена в низкочастот-

ном диапазоне (при указанных характеристиках ЭСР полоса пропускания импульсов ~ от долей Гц до 10 МГц). Однако необходимо учитывать, что импеданс отдельных цепей прохождения ЭМИ в тракт преобразования измерительной системы неодинаков и имеет зависимость от частоты, поэтому важно проанализировать опасность проникновения ЭМИ в электронные устройства не только в низкочастотном, но и в высокочастотном диапазоне (~ до 1 ГГц).

ЭМИ наиболее опасны когда разряды возникают на печатных платах электронных устройств и воздействуют непосредственно на выводы микросхем. В рассматриваемой измерительной системе наиболее уязвимыми к воздействию ЭМИ являются ЧЭ ТС и измерительные кабели, так как провода их линий связи подключены к входным цепям каналов измерения ИМКТ, соединенными непосредственно с выводами микросхем.

Когда происходят непрямые ЭСР энергия ЭМИ, вызванная излучением электромагнитных полей, проникает через различные участки общего электростатического экрана и воздействует на проводники всех составных частей измерительной системы или (в случае ближнего поля) через емкостную связь по электрическому полю и через индуктивную связь по магнитному полю, или (в случае дальнего поля) через электромагнитную связь, проявление которых обнаруживается на достаточно высоких частотах. В результате в проводниках при воздействии электромагнитных полей индуцируются импульсные напряжения и токи помех, спектральный состав которых находится за пределами полосы пропускания ИМКТ. Такие помехи имеют по отношению к общей шине питания ИМКТ синфазную и дифференциальную составляющие, уровни которых обычно из-за низкого импеданса проводящих поверхностей общего электростатического экрана не превышают долей вольта. Однако из-за наличия в спектре излучаемых электромагнитных полей высокочастотных составляющих, они также могут проникать через разрывы в экранах кабелей и зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора и напрямую воздействовать на электрические цепи с высоким импедансом, наводя в них импульсные помехи, уровни которых могут достигать порядка нескольких вольт. Такие уровни наведенных импульсных помех обычно не вызывают прямого повреждения электронных устройств в измерительном приборе, однако могут привести к сбоям в работе ИМКТ из-за появления импульсного смещения напряжения в усилителе МСИ и, как следствие, к нарушению нормального функционирования измерительного прибора. Следует отметить, что в ИМКТ синфазная составляющая помех практически не влияет на результат измерения полезного сигнала, так как для его измерения в МСИ используют усилитель

дифференциального типа. В то же время для ослабления дифференциальной составляющей помехи может потребоваться использовать аналогичные схемотехнические и конструктивные способы защиты от помех, как и для случая воздействия ЭМП.

Еще опаснее воздействие ЭМИ на измерительную систему от прямых ЭСР, в результате которого на корпусе измерительного прибора или на локальных экранах элементов КА и экранах кабелей при растекании тока разряда через точки соединения с корпусом КА возникают наведенные импульсные помехи с повышенными уровнями напряжений (зависят от сопротивлений участков экранов в местах воздействия прямых ЭСР). В спектральном составе таких помех содержатся низкочастотные составляющие (от долей Гц), попадающие в полосу пропускания ИМКТ, которые дают существенный вклад в формировании уровня напряжений наведенных помех. Эти помехи вызывают наибольшую опасность при воздействии на провода линий связи измерительных кабелей и ЧЭ ТС, так как не могут быть отфильтрованы. Попадая через провода линий связи во входные цепи каналов измерения ИМКТ, они могут за счет перенапряжений привести не только к сбоям в работе ИМКТ и нарушению нормального функционирования измерительного прибора, но и вызвать скрытые повреждения и необратимые отказы. Поэтому для измерительных кабелей и ТС существенным моментом является введение дополнительных электростатических экранов, позволяющих в пределах полосы пропускания ИМКТ защитить провода линий связи и ЧЭ ТС от воздействия наведенных импульсных помех.

Следует отметить, что на экранах измерительных кабелей и локальных экранах элементов КА перенапряжения наведенных импульсных помех возникают относительно корпуса измерительного прибора и воздействуют на все входные цепи каналов измерения, включая общую шину питания ИМКТ, прежде всего синфазно, что приводит к проникновению импульсных помех в ИМКТ не через входные цепи, а через внутренние цепи МСИ, связанные с корпусом прибора через паразитные емкости. В этом случае уровень наведенных синфазных помех может быть ослаблен введением синфазного фильтра между общей шиной питания ИМКТ и корпусом прибора или введением между МСИ и корпусом прибора потенциального экрана, соединенного с общей шиной питания ИМКТ. При этом необходимо учитывать, что разнополярные цепи сигнальных линий связи в измерительных кабелях относительно источника наведенных синфазных помех имеют различный импеданс, поэтому между этими цепями будет образовываться дифференциальная составляющая импульсных помех, которая может привести

к перенапряжениям во входных цепях каналов измерения ИМКТ. В этом случае при недостаточной эффективности дополнительного экранирования может потребоваться введение во входные цепи каналов измерения ИМКТ специальных схем защиты от перенапряжений.

Воздействие кондуктивных помех СЭП

Кондуктивные помехи СЭП, воздействующие на измерительный прибор по бортовым шинам через кабель питания, вызваны работой БА КА, шины питания которых объединены на выходе СЭП. Основными источниками таких помех являются импульсные преобразователи напряжения питания, силовые распределительные системы, силовое электронное оборудование. Частотный спектр таких помех ограничен диапазоном от 10 Гц до 100 МГц и в основном сосредоточен в низкочастотной области диапазона. Допустимые нормы на уровни кондуктивных помех в этом диапазоне приводят в технических требованиях на измерительные приборы.

Поскольку отрицательная шина питания СЭП заземлена на корпус КА, то в процессе работы БА на бортовых шинах питания относительно корпуса измерительного прибора могут возникать как дифференциальные, так и синфазные составляющие кондуктивных помех. Дифференциальные помехи возникают вследствие непрерывных пульсаций и переходных процессов выходного напряжения СЭП. Синфазные помехи возникают в цепи соединения СЭП с корпусом КА вследствие протекания токов эмиссии синфазных помех всей совокупности БА КА, подключенных к отрицательной шине питания СЭП. Скачкообразное изменение падения напряжения на проводах бортовых шин питания вследствие перепадов тока нагрузки дают вклад как в синфазную, так и в дифференциальную составляющие помех.

Нижний участок указанного диапазона пересекается с полосой пропускания ИМКТ, поэтому оценку опасности проникновения в ИМКТ дифференциальной и синфазной составляющих помех по шинам питания следует проводить с учетом этой особенности. Дифференциальная составляющая помехи представляет собой наибольшую опасность в нижней части частотного диапазона, так как ее проникновение в ИМКТ происходит через цепи вторичного питания ПМ в основном в полосе пропускания ИМКТ. Синфазная составляющая помехи напротив представляет собой наибольшую опасность в верхней части частотного диапазона, так как ее проникновение в ИМКТ происходит в основном через паразитные емкости с корпусом измерительного прибора. В обоих случаях уровень помех может быть ослаблен введением в цепи первичных и вторичных шин питания ПМ соответствующих дифференциальных и синфазных фильтров.

Воздействие шумов ЧЭ ТС

Шумы ЧЭ ТС, воздействующие на измерительный прибор по линиям связи измерительных кабелей, вызваны флуктуациями протекающего через ЧЭ измерительного тока, формируемого в ИМКТ. Генерация шумов происходит во всех полупроводниковых приборах и резисторах, участвующих в ИМКТ в формировании измерительного тока, и в самом ЧЭ ТС. Шумы на выводах ЧЭ ТС являются результатом генерации шумов во всех этих элементах и представляют собой комбинацию белого и розового шумов.

Первопричиной шумов являются случайные процессы, вследствие этого предсказать величину мгновенной амплитуды шума невозможно. Поэтому амплитуду шума U_n описывают гауссовским (нормальным) распределением на графике плотности шумового напряжения, на котором среднеквадратичное (*RMS*) значение шума U_{nRMS} представляет собой стандартное отклонение σ распределения шума, а зависимость спектральной плотности шума $S(f)$ от частоты описывают графиком для комбинации белого и розового шумов, приведенных в [14].

По графику, отражающему в [14] частотную зависимость спектральной плотности шума $S(f)$, прослеживается, что на высоких частотах доминирует белый шум, а на низких – розовый шум. Для белого шума характерна равномерная спектральная плотность. В этом случае энергия шума будет одинакова в любой заданной полосе частот. Для розового шума энергия шума определяется площадью под кривой спектральной плотности шума между верхней (F_H) и нижней (F_L) частотами полосы. В данном случае энергия шума одинакова в каждой частотной декаде. Это создает спектральную плотность мощности, обратно пропорциональную частоте, из-за чего розовый шум часто называют $1/f$ -шумом. Границу между розовым и белым шумами определяет частота излома F_c .

В полупроводниковых приборах различают две разновидности розового шума – фликкер-шум (flicker noise) и шум, вызванный случайными скачками тока (random noise).

Фликкер-шум (также называемый $1/f$ -шумом или контактным шумом) – избыточный шум, генерируемый случайными флуктуациями тока, причиной которых являются дефекты в полупроводниковых материалах. Частота, ниже которой интенсивность фликкер-шума начинает превышать интенсивность белого шума, называют частотой излома F_c . Как правило, частота излома лежит в диапазоне от 0,1 Гц до 1 кГц и варьируется в зависимости от источников шума. Фликкер-шум является серьезной помехой во многих электронных приборах, в усилителях низкой частоты, в стандартах частоты и др. Поэтому это явление не обделено вниманием теоретических исследований. Исследованию явле-

ния фликкер-шума и его проявления в электронных приборах посвящено большое количество работ, тем не менее это явление остается недостаточно изученным. Поэтому работы в направлении понимания этого явления и поиска новых методов борьбы с ним продолжают [15; 16].

Шум, вызванный случайными скачками тока (также называемый импульсным шумом – burst noise) – это низкочастотные модуляции тока из-за захвата и эмиссии носителей заряда, причиной которого является загрязнение полупроводниковых материалов ионами тяжелых металлов. Эти скачки носят случайный характер с частотой ниже 100 Гц и характеризуются дискретной амплитудой и длительностью от 1 мс до 1 с.

Фликкер-шумы и шумы, вызванные случайными скачками тока, от всех источников суммируются согласно правилу сложения среднеквадратичных значений. После чего они описываются одним источником, действующим на выходе полупроводникового устройства, и характеризуются одной результирующей спектральной плотностью шума и одной частотой излома.

Следует отметить, что суммарный уровень шума на выводах ЧЭ ТС обычно невелик, поэтому при невысоких требованиях к погрешности измерения его влиянием на результаты измерения обычно пренебрегают. Однако при необходимости проведения прецизионных измерений пренебрегать влиянием шума на результаты измерения уже нельзя. Необходимо производить оценку его влияния в зависимости от параметров МСИ в ИМКТ.

Уровень шума на выводах ЧЭ ТС зависит от значения измерительного тока – чем меньше ток, тем больше составляющая шума по сравнению с полезным сигналом. Однако увеличение измерительного тока через ЧЭ ТС хотя и приводит к увеличению отношения сигнал/шум, но при этом создает другую проблему, свойственную ТС – это явление самонагрева ЧЭ, в результате которого появляется ошибка измерения. Поэтому соотношение сигнал-шум может быть отрегулировано в МСИ ИМКТ оптимальным выбором значения измерительного тока при импульсном опросе ЧЭ ТС.

Белый шум может быть легко ограничен низкочастотными фильтрами, определяющими полосу пропускания ИМКТ. С розовым шумом дело обстоит намного сложнее. Он не может быть ослаблен введением низкочастотных фильтров, так как его энергетический спектр сосредоточен в полосе пропускания ИМКТ. Поскольку розовый шум заметно проявляется на частотах ниже частоты излома F_c , то результат его воздействия на интервале измерения менее $1/F_c$ будет приводить к фиксированному смещению напряжения в усилителе МСИ ИМКТ. Однако это смещение может быть уменьшено применением метода стабилизации прерыванием [16].

3. Влияние характеристик действующих на измерительную систему помех на определение мер по обеспечению помехоустойчивости ИМКТ

Результаты проведенного анализа основных характеристик действующих на измерительную систему помех и выявленные пути их проникновения в ИМКТ сведены в таблицу. Из табл. 1 видно, что возможные пути проникновения помех в ИМКТ определяются не только местом их воздействия на измерительную систему, но и зависят от их частотных и временных характеристик.

Проникновение в ИМКТ помех, которые воздействуют на измерительную систему посредством излучения электромагнитных полей (ЭМП, РЧП и помехи при не прямых ЭСР), происходит за пределами полосы пропускания ИМКТ. Эти помехи проникают в ИМКТ в зависимости от длины волны излучения либо через электростатические экраны и распространяются по проводам измерительных кабелей и кабеля питания, либо через зазоры в конструкции корпуса измерительного прибора и распространяются по внутренним цепям МСИ ИМКТ. При этом по отношению к входным и внутренним цепям МСИ образуются синфазные и дифференциальные составляющие помех. В обоих случаях помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены в МСИ и перенесены в область более низких частот и попасть в поло-

су пропускания ИМКТ. В качестве мер по ослаблению таких помех целесообразно использовать дополнительное экранирование и повив проводов измерительных кабелей, а в высокочувствительных цепях ИМКТ либо вводить радиочастотные фильтры, либо использовать специальную экранирующую конструкцию.

Проникновение в ИМКТ помех, которые воздействуют на измерительную систему при прямых ЭСР, происходит как в пределах полосы пропускания ИМКТ, так и за ее пределами. Эти помехи проникают в ИМКТ за счет наведенных помех на электростатических экранах и корпусе измерительного прибора при растекании импульсных токов разряда, в результате которых возникают вторичные переменные или постоянные электрические поля, генерирующие токи помех в проводах кабелей и во внутренних цепях МСИ ИМКТ. При этом также, как и при излучении электромагнитных полей, по отношению к входным и внутренним цепям МСИ образуются синфазные и дифференциальные составляющие помех. Такие помехи вследствие импульсного характера воздействия могут приводить не только к кратковременным смещениям напряжения на выходе усилителя МСИ, но и к перенапряжениям во входных цепях ИМКТ. Поэтому в случае недостаточной эффективности дополнительного экранирования в измерительных кабелях может потребоваться введение во входные цепи каналов измерения ИМКТ специальных схем защиты от перенапряжений.

Таблица 1

Результаты анализа основных характеристик действующих на измерительную систему помех и выявленные пути их проникновения в ИМКТ

Тип помех	Частотный диапазон	Спектральный состав	Характер воздействия	Пути проникновения
ЭМП	1 МГц – 18 ГГц	Широкий неравномерный частотный спектр (на отдельных участках диапазона выделяется спектр узкополосных помех с преобладающими частотными составляющими)	Непрерывное излучение электромагнитных полей	1. По проводам линий связи измерительных кабелей при воздействии прошедших полей через электростатические экраны
РЧП	300 МГц – 30 ГГц	Относительно узкий частотный спектр на несущих частотах модулированных высокочастотных сигналов, ширина которых определяется частотой модуляции	Периодическое излучение электромагнитных полей	2. По внутренним цепям функциональных узлов измерительного прибора при воздействии прошедших полей через зазоры в конструкции его корпуса
Помехи ЭСР	1 МГц – 1 ГГц при не прямых ЭСР	Широкий частотный спектр, в котором до 90 % энергии сосредоточено в низкочастотной области (полоса пропускания импульсов ~ до 10 МГц), остальная энергия – в высокочастотной области (~ до 1 ГГц)	Импульсное излучение электромагнитных полей	3. По проводам измерительных кабелей и кабеля питания при воздействии наведенных помех на электростатических экранах
	Доли Гц – 1 ГГц при прямых ЭСР		Импульсное растекание токов разряда по электростатическим экранам	

Продолжение таблицы 1

Кондуктивные помехи СЭП	10 Гц – 100 МГц	Широкий частотный спектр, в котором энергия сосредоточена в основном в низкочастотной области	Пульсирующее и скачкообразное изменение напряжения на бортовых шинах СЭП	4. По проводам бортовых шин кабелей питания при эмиссии кондуктивных помех всей совокупности БА КА
Шумы ЧЭ ТС	$f > F_c$ для белого шума	Равномерная спектральная плотность шума $S(f)$ (энергия шума одинакова в любой заданной полосе частот)	Хаотическое изменение напряжения на выводах ТС Примечание: F_c – частота излома на графике спектральной плотности шума $S(f)$ [14]	5. По проводам линий связи измерительных кабелей при импульсном опросе ЧЭ ТС измерительным током, формируемым в ИМКТ
	$f < F_c$ для розового шума ($1/f$ -шума)	Спектральная плотность шума $S(f)$ растет с понижением частоты по закону, близкому к $1/f$ (энергия шума одинакова в каждой декаде частот)		

Проникновение в ИМКТ кондуктивных помех СЭП также происходит в пределах полосы пропускания ИМКТ и за ее пределами. Эти помехи распространяются по проводам кабеля питания и проникают в ИМКТ в виде дифференциальной составляющей через шины вторичного питания МП и в виде синфазной составляющей через внутренние цепи МСИ. Дифференциальная составляющая оказывает существенное влияние на ИМКТ в области низких частот в пределах полосы пропускания, а синфазная составляющая напротив – в области высоких частот за пределами полосы пропускания. В обоих случаях уровень таких помех может быть ослаблен введением в цепи первичных и вторичных шин питания ПМ соответствующих дифференциальных и синфазных фильтров.

Проникновение в ИМКТ шумов ЧЭ ТС происходит в пределах полосы пропускания ИМКТ. Это вызвано тем, что действующие шумы на ЧЭ ТС (белый и розовый) распространяются по сигнальным проводам измерительных кабелей и воздействуют только на дифференциальные входы МСИ ИМКТ. При таком воздействии влияние шумов на ИМКТ происходит в основном на низких частотах, а на высоких частотах шумы легко ослабляются низкочастотными фильтрами, определяющими полосу пропускания ИМКТ. В пределах полосы пропускания ИМКТ в качестве мер по ослаблению действующих шумов на ЧЭ ТС

может быть в случае белого и розового шумов повышение соотношения сигнал/шум путем выбора оптимального значения измерительного тока при импульсном опросе ЧЭ ТС, и в случае розового шума дополнительное применение метода стабилизации прерыванием.

Заключение

Проведенный анализ характеристик действующей на измерительную систему в заданной области пространства КА совокупности различных видов помех и путей их проникновения в ИМКТ показал, что меры по ослаблению этих помех, позволяющие обеспечить требуемую помехоустойчивость ИМКТ в составе измерительного прибора, должны определяться после оценки опасности их проникновения в ИМКТ по каждому пути отдельно во всем частотном диапазоне их воздействия.

Проведение таких оценок позволит в дополнение к общим мерам по ослаблению действующей на измерительную систему совокупности помех, предусмотренным на уровне КА, также определить комплекс обоснованных мер по обеспечению помехоустойчивости ИМКТ в составе измерительного прибора, которые должны реализовываться в совокупности на уровнях проектирования измерительной системы, измерительного прибора и ИМКТ.

Список литературы

- [1] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск. 2009. Ч. 1. С. 20–22.
- [2] Горностаев А. И. Блок управления нагревателями аппаратуры космического аппарата. Пат. № 2660098, Российская Федерация, 2018. Бюл. № 19.
- [3] Горностаев А. И. Оптимизация структуры унифицированного многоканального интерфейсного модуля контроля температур для измерительных приборов космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2019. Т. 3. № 3. С. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183

- [4] Горностаев А. И. Контроль параметров помех на шинах питания бортовой аппаратуры в служебных системах космического аппарата // Известия вузов. Приборостроение. 2008. № 8. С. 28–33.
- [5] Горностаев А. И., Капустин А. Н., Школьный В. Н., Кольцов А. В. Проблема непрерывного контроля кондуктивных помех на шинах питания бортовой аппаратуры при летной эксплуатации космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 12. С. 34–38.
- [6] Долганов Е. С., Горностаев А. И. Моделирование экранированного гибкого печатного кабеля в системе TALGAT // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск. 2009. Ч. 1. С. 23–25.
- [7] ГОСТ Р 56529-2015. Совместимость космической техники электромагнитная. Общие требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2016.
- [8] ГОСТ Р 56515-2015. Аппараты космические автоматические и системы бортовые служебные космических аппаратов. Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества. М. : Стандартинформ, 2019.
- [9] Соколов А. Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. М. 2009. 236 с.
- [10] Костин А. В. Методика и средства оценки воздействия электромагнитного поля электростатического разряда на бортовую аппаратуру космических аппаратов : дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Самара. 2015. 188 с.
- [11] Абрамешин А. Е. Методология проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с учетом воздействия поражающих факторов электризации : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. М. 2017. 262 с.
- [12] Костин А. В., Пиганов М. Н. Разработка рекомендаций по применению методов защиты бортовой аппаратуры от помех электростатического разряда // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7. С. 54–56.
- [13] Костин А. В., Пиганов М. Н. Алгоритм разработки мер комплексной защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от помех в бортовой кабельной сети, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7. С. 57–59.
- [14] Эдвардс С. Оптимизация шумовых параметров сигнальных цепей. Часть 1. Шум в полупроводниках – предотвратим или неизбежен? // Электронные компоненты. 2013. № 10. С. 9–15.
- [15] Загадка фликкер-шума разгадана [Электронный ресурс]. URL: habr.com/ru/post/262015/ (дата обращения: 15.04.2021).
- [16] 1/f-шум: понимание и методы борьбы [Электронный ресурс]. URL: krs.terraelectronica.ru/news/6096 (дата обращения: 15.04.2021).

FEATURES OF ENSURING NOISE IMMUNITY OF INTERFACE MODULES FOR TEMPERATURE CONTROL IN MEASURING INSTRUMENTS OF SPACECRAFT

A. I. Gornostaev

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

An important stage in the development of temperature control interface modules for measuring instruments, implemented according to the main-modular principle of construction on the basis of a central instrument module and used as part of a measuring system on spacecraft for various purposes, is to ensure their noise-immune operation when the measuring system is exposed to a combination of various types of interference which determine the electromagnetic environment on the spacecraft. The article is devoted to the analysis of the characteristics of various types of interference affecting the measuring system, identifying the ways of their penetration into the temperature control interface module and determining the influence of the characteristics of these interference on the choice of measures to ensure the required noise immunity of the temperature control interface module as part of the measuring device. It is shown that the paths of interference penetration into the interface temperature control module depend on the frequency and time characteristics of the interference affecting the measuring system. Measures to mitigate these interference must be determined after assessing the danger of their penetration into the interface temperature control module for each path separately in the entire frequency

range of their impact. Based on the results of such assessments, a set of reasonable measures should be determined to ensure the noise immunity of the interface temperature control module as part of the measuring device, implemented in combination at the design levels of the measuring system, the measuring device and the interface temperature control module.

Keywords: spacecraft, measuring instrument, temperature control, thermal resistance converter, electromagnetic field, noise immunity, noise mitigation.

References

- [1] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Zubavichus V. A., Kolesnikov S. M. *Primeneniye magistral'no-modul'nogo printsipa pri postroyenii bortovoy apparatury bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskikh apparatov* [The use of the trunk-modular principle in the construction of the onboard equipment of the onboard complex control spacecraft]. Reshetnev readings: materials of the XIII International scientific conference, Krasnoyarsk, 2009, Part 1, pp. 20–22. (In Russian)
- [2] Gornostaev A. I. *Blok upravleniya nagrevatelyami apparatury kosmicheskogo apparata* [Control unit for space vehicle equipment heaters]. Patent RU 2660098, 2018, bulletin no. 19.
- [3] Gornostaev A. I. Optimization of the structure of the unified multi-channel interface temperature control module for measuring instruments of spacecraft // *Spacecraft & Technologies*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 171–183. doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-171-183
- [4] Gornostaev A. I. *Kontrol' parametrov pomekh na shinakh pitaniya bortovoy apparatury v sluzhebnykh sistemakh kosmicheskogo apparata* [Monitoring of interference parameters on the power supply buses of the onboard equipment in the spacecraft service systems] // *Proceedings of the universities. Instrument making*, 2008, no. 8, pp. 28–33. (In Russian)
- [5] Gornostaev A. I., Kapustin A. N., Shkolny V. N., Koltsov A. V. *Problema nepreryvnogo kontrolya konduktivnykh pomekh na shinakh pitaniya bortovoy apparatury pri letnoy ekspluatatsii kosmicheskikh apparatov* [The problem of continuous monitoring of conducted interference on the power buses of onboard equipment during flight operation of spacecraft] // *Aerospace instrumentation*, 2011, no. 12, pp. 34–38. (In Russian)
- [6] Dolganov E. S., Gornostaev A. I. *Modelirovaniye ekranirovannogo gibkogo pechatnogo kabelya v sisteme TALGAT* [Simulation of a screened flexible printed cable in the TALGAT system]. Reshetnev readings: materials of the XIII International scientific conference, Krasnoyarsk, 2009, Part 1, pp. 23–25. (In Russian)
- [7] *GOST R 56529-2015. Sovmestimost' kosmicheskoy tekhniki elektromagnitnaya. Obshchiye trebovaniya i metody ispytaniy* [State Standard R 56529-2015. Electromagnetic compatibility of space technology. General requirements and test methods]. Moscow, Standartinform, 2016. (In Russian)
- [8] *GOST R 56515-2015. Apparaty kosmicheskoye avtomaticheskoye i sistemy bortovyye sluzhebnyye kosmicheskikh apparatov. Obshchiye trebovaniya po zashchishchennosti i stoykosti k vozdeystviyu elektrofizicheskikh faktorov kosmicheskogo prostranstva i staticheskogo elektrichestva* [State Standard R 56515-2015. Automatic space vehicles and onboard service spacecraft systems. General requirements for protection and resistance to the effects of electrophysical factors of outer space and static electricity]. Moscow, Standartinform, 2019. (In Russian)
- [9] Sokolov A. B. *Obespecheniye stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektrosticheskikh razryadov* [Ensuring stability of the onboard radioelectronic equipment of spacecraft to the effects of electrostatic discharges] : Doct. Diss. Moscow, 2009, 236 p. (In Russian)
- [10] Kostin A. V. *Metodika i sredstva otsenki vozdeystviya elektromagnitnogo polya elektrosticheskogo razryada na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Methodology and means of assessing the effect of the electromagnetic field of an electrostatic discharge on the onboard equipment of spacecraft] : Cand. Diss. Samara, 2015, 188 p. (In Russian)
- [11] Abrameshin A. E. *Metodologiya proyektirovaniya bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov s uchetom vozdeystviya porazhayushchikh faktorov elektrizatsii* [Methodology for designing on-board radioelectronic equipment for spacecraft taking into account the impact of the damaging factors of electrification] : Doct. Diss. Moscow, 2017, 262 p. (In Russian)
- [12] Kostin A. V., Piganov M. N. *Razrabotka rekomendatsiy po primeneniyu metodov zashchity bortovoy apparatury ot pomekh elektrosticheskogo razryada* [Development of recommendations on the application of methods for protecting on-board equipment from electrostatic discharge interference] // *International scientific research journal*, 2015, no. 7, pp. 54–56. (In Russian)
- [13] Kostin A. V., Piganov M. N. *Algoritm razrabotki mer kompleksnoy zashchity bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov ot pomekh v bortovoy kabel'noy seti, vyzvannykh elektromagnitnym polem elektrosticheskogo razryada* [Algorithm for the development of measures for the integrated protection of spacecraft on-board equipment from interference in the on-board cable network caused by the electromagnetic field of an electrostatic discharge] // *International scientific research journal*, 2015, no. 7, pp. 57–59. (In Russian)

- [14] Edwards S. *Optimizatsiya shumovykh parametrov signal'nykh tsepey. Chast' 1. Shum v poluprovodnikakh – predotvratim ili neizbezhen?* [Optimization of noise parameters of signal circuits. Part 1. Noise in semiconductors – preventable or unavoidable?] // *Electronic components*, 2013, no. 10, pp. 9–15. (In Russian)
- [15] The mystery of flicker noise has been solved. Available at: habr.com/ru/post/262015/ (accessed 15.04.2021).
- [16] 1/f-noise: understanding and methods of struggle. Available at: krs.terraelectronica.ru/news/6096 (accessed 15.04.2021).

Сведения об авторе

Горностаев Алексей Иванович – кандидат технических наук, начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники в 1980 году. Область научных интересов: методы повышения надежности и принципы построения бортовой аппаратуры космических аппаратов, схемотехника аналоговых и цифровых электронных устройств, унификация функциональных узлов бортовой аппаратуры.