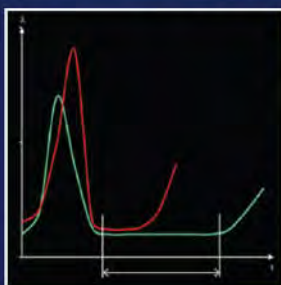


Н.Н. Севастьянов
А.И. Андреев

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ОАО «ГАЗПРОМ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

Н.Н. Севастьянов, А.И. Андреев

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Учебное пособие

*Под общей редакцией зав. кафедрой
промышленных космических систем ТГУ
Н.Н. Севастьянова*

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2015

УДК 629.7.05

ББК 39.67

C28

Севастьянов Н.Н., Андреев А.И.

C28 Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации / под общ. ред. Н.Н. Севастьянова. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2015. – 266 с.

ISBN 978-5-94621-460-5

В пособии рассмотрены актуальные проблемы обеспечения надежности космических аппаратов, к которым предъявляются высокие требования по долговечности. Все вопросы изложены системно на основе физических подходов и методов, практически реализованных в проектах по созданию систем космической связи «Ямал».

Учебное пособие адресовано преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов ВУЗов (технических университетов), специализирующимся в области космической техники. Оно будет полезно специалистам, занимающимся разработкой, производством, испытаниями и эксплуатацией космической техники, а также специалистам предприятий других отраслей промышленности, где вопросы надежности и качества относятся к приоритетным.

УДК 629.7.05

ББК 39.67

Рецензенты:

Данилин Николай Семенович, д-р техн. наук, проф., зам. начальника
НЦ ОАО «Российские космические системы» по научной работе,
лауреат премии СМ СССР;

Кофанов Юрий Николаевич, проф., д-р техн. наук, проф. каф. радиозлектроники
и телекоммуникаций Московского института электроники и математики
Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»
(МИЭМ НИУ ВШЭ), лауреат премии Правительства РФ

ISBN 978-5-94621-460-5

© Севастьянов Н.Н., Андреев А.И., 2015

© Томский государственный университет, 2015

© ОАО «Газпром космические системы», 2015

ОТ РЕДАКТОРА

Для Российской Федерации системы спутниковой связи и телевизионного вещания являются основным средством получения и передачи информации в обеспечение нужд общества. Потенциально высокая эффективность систем спутниковой связи определила приоритетность их развития среди других направлений космической деятельности государственных и частных компаний.

В настоящее время на геостационарной орбите работают около 300 спутников связи, ежегодно в мире запускается от 20 до 30 новых космических аппаратов, характеристики которых в определяющей степени влияют на эффективность работы систем спутниковой связи.

К числу основных требований, предъявляемых к характеристикам спутников связи, относятся требования высокой безотказности и долговечности.

Такое положение определяется высокой стоимостью реализации проектов по созданию и эксплуатации систем спутниковой связи. Так, в зависимости от энерговооруженности затраты на создание современных спутников связи оцениваются суммами от 150 до 250 млн долларов, а с учетом запуска на орбиту цена спутника может превышать 350 млн долларов. Вложенные в спутниковые системы средства должны окупаться за счет реализации услуг космической связи, обеспечивая рентабельность проектов [1, 2].

В современных условиях конкурентоспособность и рентабельность проектов предоставления услуг космической связи делают необходимым создание космического аппарата (КА) со сроком эксплуатации на геостационарной орбите 15 и более лет.

Именно экономическими причинами, необходимостью обеспечения самокупаемости проектов объясняется рост требований к срокам активного функционирования (САФ) КА.

Однако до последнего времени отечественные спутники связи имели САФ не более 8 лет, что не могло удовлетворить заказчиков – спутниковых операторов.

Орбитальная группировка спутников связи ОАО «Газпром космические системы», а также наземный комплекс управления космическими аппаратами и технические комплексы предоставления услуг связи потребителям созданы и развиваются как инвестиционные проекты на кредитные средства. В этих условиях необходимость обеспечения рентабельности и конкурентоспособности отечественных спутников связи потребовала поиска новых проектных и конструкторских решений, позволяющих без увеличения массы КА повысить его энерговооруженность для наращивания потенциальных возможностей полезной нагрузки (Пн), улучшить технологичность и упростить процессы сборки и эксплуатации КА. При этом каждое из усовершенствований должно способствовать увеличению ресурса КА.

Принципиальными с точки зрения достижения указанных целей проектными решениями явился осуществленный впервые в отечественной практике на КА типа «Ямал» переход от моноблочной конструктивно-компоновочной схемы КА с расположением аппаратуры преимущественно в гермоотсеках на свободно несущую схему построения негерметичного КА. Такие КА типа «Ямал-100» были созданы по заказу ОАО «Газком». Опыт эксплуатации КА «Ямал-102» и последующих КА типа «Ямал-200» подтвердил эффективность принятых проектных решений и их потенциальные возможности по обеспечению длительных сроков эксплуатации на геостационарной орбите.

Применительно к современным КА наибольшие трудности в обеспечении длительных САФ возникают со стороны электронных систем космических объектов. Причины такого положения – в высоких темпах роста функциональной и аппаратной сложности электронных систем КА и недостаточной надежности электронной компонентной базы, выпускаемой отечественными предприятиями.

Обобщенные данные о росте сложности электронных систем спутников связи различных лет выпуска, оцениваемой количеством применяемых в них комплектующих электрорадиоизделий (ЭРИ), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные о росте сложности электронных систем

КА (год сдачи в эксплуатацию)	Горизонт (1979)	Радуга (1982)	Луч (1986)	Ямал-100 (2000)	Ямал-200 (2004)	Ямал-300К (2012)	Ямал-401 (2014)
Общее количество ЭРИ в приборах КА, тыс. шт.	12	23	65	90	100	120	150

Как видно из представленных в табл. 1 данных, за рассматриваемые 35 лет зафиксирован более чем 10-кратный рост сложности электронных систем КА. В то же время заметного увеличения надежности комплектующих ЭРИ не наблюдается, а процессы разработки и изготовления аппаратуры КА на предприятиях космического приборостроения сопровождаются значительными недостатками, служащими причинами отказов бортовой аппаратуры в процессе эксплуатации.

На рис. 1 приведены данные о количестве замечаний и неисправностей, фиксируемых в первые годы эксплуатации КА, созданных отечественными предприятиями. Эти данные отражают тенденцию роста количества несоответствий (замечаний, неисправностей, отказов), фиксируемых при эксплуатации КА последних лет выпуска.

Работоспособность большинства находящихся на геостационарной орбите (ГСО) КА поддерживается за счет значительной аппаратной избыточности бортовых систем.

Перечисленные выше трудности в обеспечении рентабельности дорогостоящих проектов по созданию спутников связи определяют данные проекты как проекты с повышенным уровнем технического риска [3].

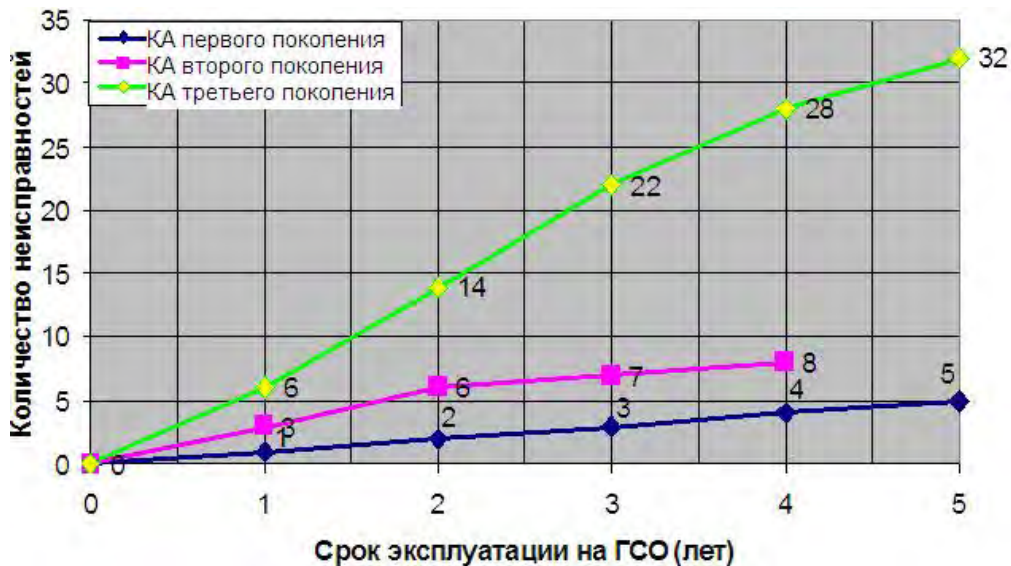


Рис. 1. Среднее число замечаний, фиксируемых в КА различных поколений

На рис. 2 приведены данные о распределении причин отказов бортового оборудования КА.

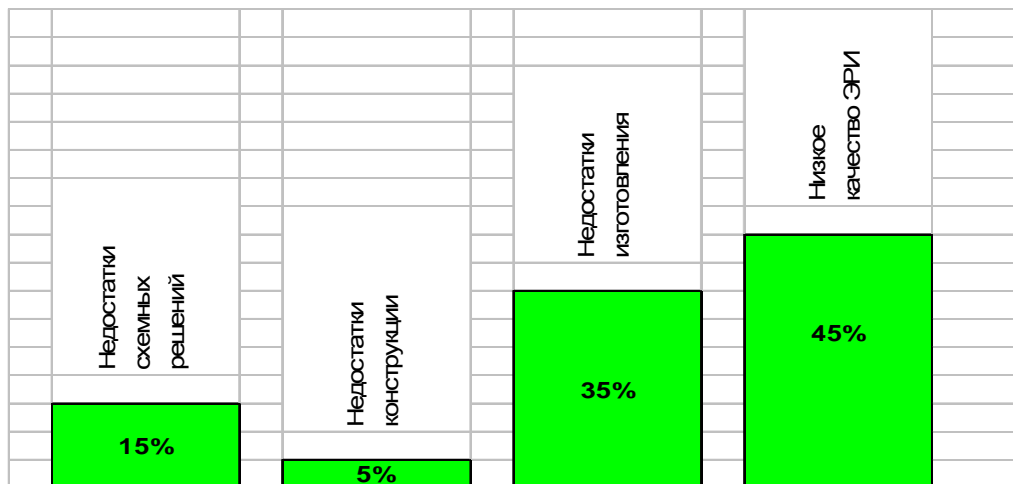


Рис. 2. Распределение причин неисправностей бортового оборудования КА

В этих условиях ОАО «Газпром космические системы» (до 2009 г. – ОАО «Газком») проведены работы по созданию описываемой в настоящем по-

собии методологии управления процессами создания КА, позволяющей минимизировать риски недостижения требуемых сроков эксплуатации.

Основы методологии были заложены при создании КА «Ямал-102», методология получила развитие при создании КА «Ямал-201» и «Ямал-202» и в наиболее полном виде реализована в КА «Ямал-300К» и «Ямал-401».

Некоторые сведения об эксплуатируемых в настоящее время КА типа «Ямал» содержатся на рис. 3–6 (КА «Ямал-201» снят с эксплуатации в июне 2014 г.).

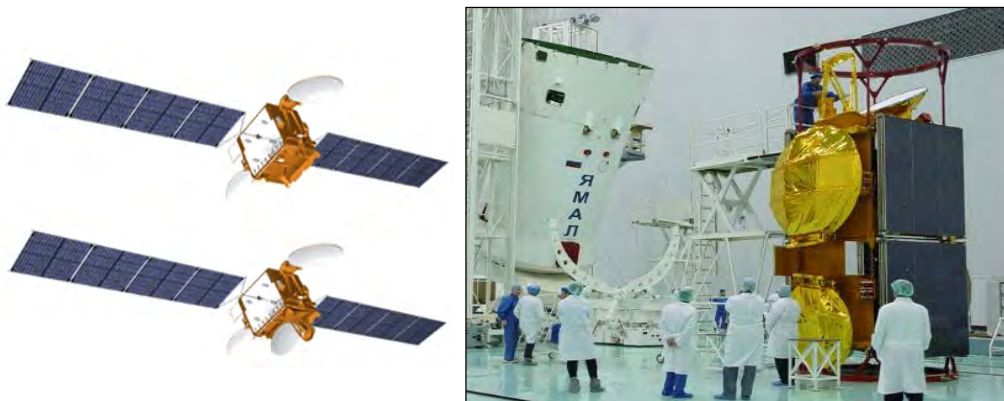


Рис. 3. КА «Ямал-201» (90° в.д.) и «Ямал-202» (49° в.д.); запущены 24.11.2003 г.



Рис. 4. КА «Ямал-300К» (90° в.д.); запущен 3.11.2012 г.

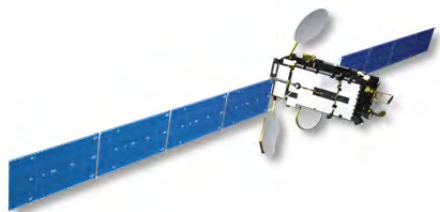


Рис. 5. КА «Ямал-402» (55° в.д.); запущен 8.12.2012 г.

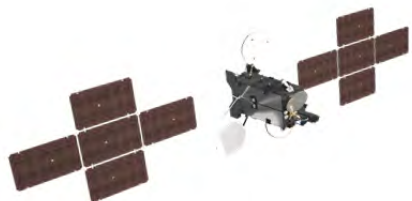


Рис. 6. КА «Ямал-401» (90° в.д.); запущен 15.12.2014 г.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов и аспирантов, специализирующихся в области создания космической техники. Учитывая новизну и практически подтвержденную эффективность описанных методических подходов, книга будет полезна также специалистам по надежности предприятий космической отрасли и предприятий других отраслей, где вопросы надежности и качества относятся к приоритетным.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие создано на основе лекций по курсу «Обеспечение длительных сроков функционирования космических аппаратов систем спутниковой связи», который читают авторы студентам физико-технического факультета Томского государственного университета. Содержание лекций основывается на результатах практических работ по управлению надежностью космических аппаратов типа «Ямал», создаваемых по заказам ОАО «Газпром космические системы».

В общем случае под управлением надежностью понимают целенаправленную деятельность по обоснованию, планированию, обеспечению, повышению и поддержанию характеристик надежности создаваемых технических объектов.

В настоящем издании рассматриваются особенности практического решения задач управления надежностью применительно к автоматическим космическим аппаратам спутниковых систем связи, которые обоснованно относят к категории наиболее сложных объектов техники, создаваемых человеком.

Сложность КА определяется сложностью и большим количеством выполняемых ими функций и, соответственно, большим количеством применяемых в их составе систем, устройств и элементов.

В свою очередь сложность проблемы обеспечения надежности КА спутниковых систем связи обусловлена:

- аппаратной сложностью объектов;
- жесткими и неблагоприятными условиями эксплуатации, включающими механические и климатические воздействия при наземных проверках и испытаниях, на этапах выведения КА на заданные орбиты, воздействия факторов космического пространства (вакуум, температура, космическая радиация и др.) при длительной эксплуатации на орбите;
- чрезвычайно высоким уровнем требований к надежности, определяемым высокой стоимостью проектов создания КА (экономическая эффективность проектов достигается при выполнении требований на уровне 15-летнего срока безотказной эксплуатации КА на целевой орбите);
- единичным характером и уникальностью процессов разработки и производства КА.

Последнее обстоятельство определяет приоритетность физических подходов к решению задач надежности КА, в основу которых положены знания о факторах, влияющих на надежность, закономерностях возникновения дефектов и их развитии в отказы, методах снижения скорости физико-химических процессов деградации (старения и износа) характеристик, приводящих к нарушениям работоспособности элементов и систем КА.

Изложению информации, накопленной в ОАО «Газпром космические системы» о физических аспектах обеспечения надежности КА, посвящена часть I пособия. Проблемы надежности КА коренятся в первую очередь в бортовых

радиоэлектронных системах, поэтому основное внимание уделено вопросам надежности бортовых радиоэлектронных средств (РЭС), радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), устройств, приборов и электронной компонентной базы (комплектующих электрорадиоизделий).

Часть 2 пособия содержит методологию управления надежностью КА с длительными сроками эксплуатации, которая включает в себя цели и принципы управления, логическую и временную структуру деятельности по ее практической реализации, технологию выполнения работ и решения задач надежности на этапах создания КА. Методология изложена применительно к деятельности ОАО «Газпром космические системы» как заказчика КА и иллюстрируется результатами ее отработки и реализации в ходе создания КА типа «Ямал» («Ямал-100», «Ямал-200» № 1 и 2, «Ямал-300К», «Ямал-401» и «Ямал-402»).

Для удобства пользования в пособие включено приложение с перечнем основополагающих понятий и определений в области надежности технических объектов.

Кроме того, авторы посчитали полезным также включить в издание приложения, в которых содержатся краткие сведения об основных классах комплектующих ЭРИ, наиболее широко применяемых в современном бортовом оборудовании КА.

Часть 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Глава 1. НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ

Понятие «надежность» как свойство орудий труда, оружия, средств передвижения сохранять работоспособное состояние используется уже несколько веков. Технический прогресс первой половины XX в. последовательно ставил вопросы все большей сложности в задачах обеспечения прочности строительных материалов и машин, систем передачи энергии и др. Естественным путем достижения высокой надежности было введение так называемых запасов прочности. При этом, конечно, происходило увеличение массы и габаритов объектов, что стимулировало изучение реальных нагрузок, действующих на материалы и конструкции при эксплуатации, и их несущих способностей, а также процессов изменения свойств объектов вследствие усталости и старения материалов. Эти задачи решались с использованием таких научных и технических дисциплин, как физика, химия, материаловедение и др., а также методов теории вероятности и математической статистики.

В конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. в ряде работ были впервые четко поставлены вопросы о статистической природе коэффициентов запаса прочности и сформулированы понятия, ставшие затем основными в теории надежности: отказ или нарушение работоспособного состояния конструкции, мера надежности конструкции, резервирование.

Вместе с тем определяющим фактором для формирования надежности как научной и технической дисциплины явился прогресс в радиоэлектронике, прежде всего в военной радиоэлектронике, наиболее сложной по составу и ответственной по выполняемым функциям, ущерб от отказа в которой наиболее ощутим [32].

Проведенный в первые годы после Второй мировой войны в США анализ состояния надежности основных радиоэлектронных средств (РЭС) и систем показал следующее: радиосвязное оборудование армии США из-за отказов находилось в неработоспособном состоянии 19% времени, гидроакустическое – 48%, радиолокационное (наиболее сложное) – 94%. Для поддержания в работоспособном состоянии 160 тыс. единиц радиоэлектронного оборудования в ВМФ США необходимо было ежегодно менять 1 млн деталей. В течение года только в 4 тыс. образцов аппаратуры было заменено 180 000 ламп.

Аналогичные трудности в обеспечении безотказной работы радиоэлектронных систем и аппаратуры в конце 40-х – начале 50-х гг. XX в. отмечались и в нашей стране. Задача поиска путей решения проблемы надежности и качества выдвинулась в число важнейших.

Фундаментальным противоречием, определявшим в те годы и определяющим в настоящее время остроту проблемы обеспечения надежности РЭС, является противоречие между высокими темпами роста сложности систем, выражающейся в количестве применяемых «активных» комплектующих электрорадиоизделий (электровакуумные приборы, транзисторы, интегральные микросхемы и т.п.), и ограниченными темпами роста надежности этих электрорадиоизделий (ЭРИ).

Исследования закономерностей развития РЭС свидетельствуют о том, что аналитически характер изменения показателя сложности $N(t)$ вытекает из общего постулата, описываемого уравнением развития от простого к сложному [33]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = aN(t).$$

После интегрирования в пределах $0 - t$ (Δt) получим

$$N(t) = N_0 e^{a(\Delta t)b},$$

где a , b – коэффициенты, присущие определённому виду аппаратуры; N_0 соответствует значению $t = 0$.

В то же время рост надежности элементной базы подчиняется закономерностям, имеющим ярко выраженные участки «насыщения», определяемые тем, что после начального периода достаточно эффективного воздействия на надежность дальнейшие действия и материальные вложения в совершенствование процессов разработки и изготовления ЭРИ не оказывают существенного влияния на рост надежности в силу достижения физических ограничений, присущих каждому классу ЭРИ.

На рис. 1.1 указанные закономерности иллюстрируются данными применительно к сложности и надежности электронных систем автоматических КА и их элементной базы различных поколений. Надежность основной элементной базы рассматриваемых систем за период 1980–2000 гг. возросла примерно в 2 раза. Однако такой рост надежности ЭРИ из-за высокого темпа усложнения систем и требований к САФ не привел к снижению остроты проблемы надежности. В то же время наблюдаемая в последнее десятилетие тенденция снижения результативности усилий по созданию новых видов, классов и групп ЭРИ, а также снижение качества и надежности комплектующих ЭРИ отдельных классов, изготавливаемых отечественными предприятиями, привели к дальнейшему обострению проблемы надежности. Данный вывод обосновывается предшествующим опытом развития радиоэлектроники, когда поддержание требуемого

уровня надежности все усложняющихся систем обеспечивалось в первую очередь путем смены поколений элементной базы, позволяющей скачкообразно увеличить ее уровни надежности.

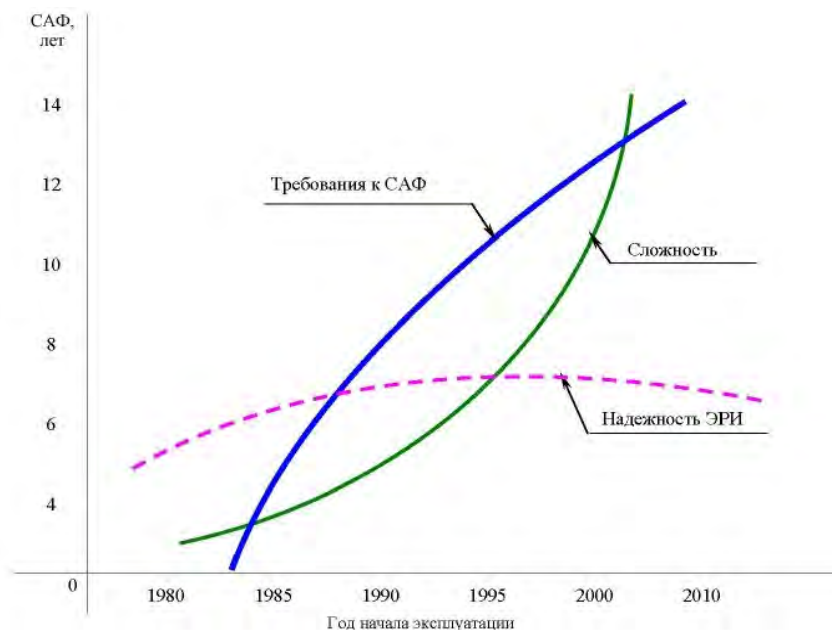


Рис. 1.1. Динамика роста требований к САФ КА, сложности КА и надежности комплектующих ЭРИ

Влияние элементной базы на функциональные и эксплуатационные характеристики РЭС столь значительно, что при ее смене РЭС приписывают названия отдельных поколений. Так, РЭС, построенные на электровакуумных приборах (ЭВП), относили к I поколению, РЭС на полупроводниковых приборах (ПП) – ко II, РЭС на интегральных микросхемах (ИС) с малой степенью интеграции и микромодулях – к III, РЭС на больших и сверхбольших интегральных схемах (БИС и СБИС) – к IV поколению. Иногда РЭС на СБИС относят к V поколению (при использовании сложных микропроцессорных устройств и нейроустройств).

Низкая надежность РЭС I поколения, основной элементной базой которых являлись электровакуумные и электромеханические приборы, обусловлена большим количеством комплектующих элементов (сотни и тысячи ЭРИ) и низкой надежностью самих элементов из-за трудностей в обеспечении длительного сохранения высокого вакуума приборов, их значительным тепловыделением, влиянием механического износа и других деградиционных процессов. Достижения в развитии радиоэлектроники, приведшие к созданию и широкому внедрению твердотельных усилительных и логических элементов (транзисторов, а

затем и интегральных микросхем), обеспечило существенный выигрыш в основных характеристиках РЭС [32]. Это положение иллюстрируется данными, приведенными в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Динамика характеристик РЭС

Поколение РЭС	Основной вид ЭРИ	Выигрыш, раз		
		по потребляемой мощности	по массе	по надёжности
I	ЭВП	1	1	1
II	ПП	100	5	5
III	ИС	1000	500	50
IV	БИС и СБИС	2 500–5 500	1 500–2 500	100–150

Среди показателей качества радиоэлектронных систем принято рассматривать следующие: функциональные характеристики (характеристики назначения) Φ , сложность N , энергопотребление W , масса M , надёжность T_0 и стоимость C ; они представляют взаимосвязанный комплекс $\Phi - N - W - M - T_0 - C$ (рис. 1.2). Обобщённый показатель качества для определённого вида непрерывно совершенствуемой аппаратуры записывают в виде функции

$$\varphi(t) = \varphi\{\Phi[N(t), W(t), C(t)], T_0(N(t), W(t), C(t))\},$$

которая отражает взаимосвязь качества и надёжности.

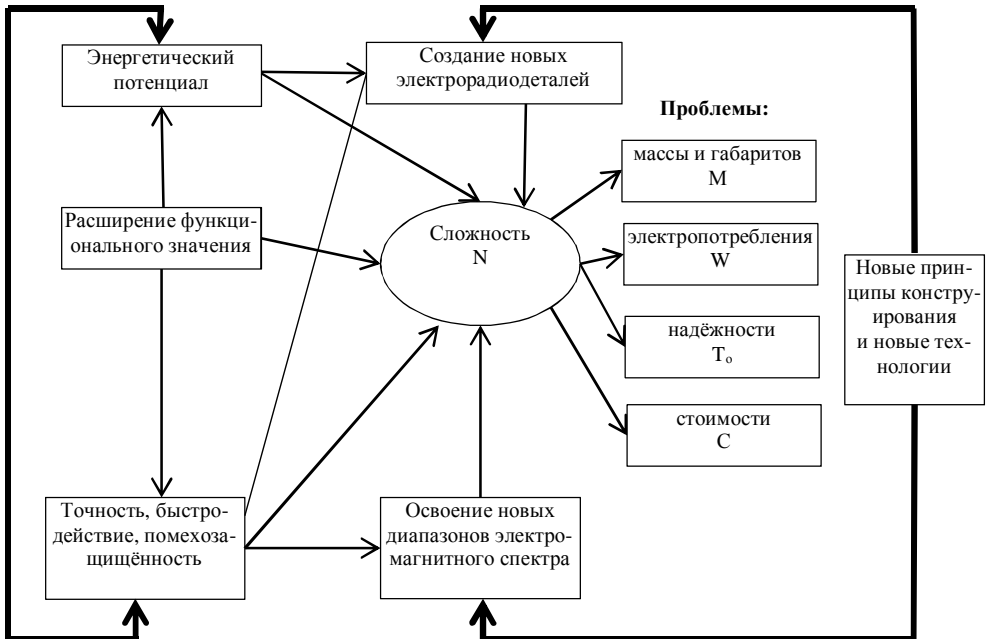


Рис. 1.2. Направления и проблемы повышения качества РЭС

В первой половине XXI в. следует ожидать крупных шагов в развитии РЭС на основе новых достижений в области фундаментальных наук и особенно электроники, биологии, микромеханики и информатики. При этом актуальность проблемы надежности не снижается в силу постоянно возрастающих требований к эксплуатационным характеристикам существующих и создаваемых суперсложных и сверхминиатюрных образцов РЭС.

В современной науке о надежности различают два взаимодополняющих подхода к изучению закономерностей появления отказов: вероятностно-статистический и физический.

С появлением в 1954 г. работы В.И. Сифорова [4] началось бурное развитие вероятностно-статистических методов, основанных на наблюдениях за наработкой, функционированием объектов и отказами. При этих подходах отказы рассматриваются как случайные события, а многообразные физические состояния объектов сводятся к двум – работоспособное и неработоспособное (состояние отказа).

Вероятностно-статистический подход к анализу надежности элементов можно рассматривать на основе обобщенной модели, в которой состояние элемента x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) описывает в n -мерном фазовом пространстве $G = \{x_i\}$ некоторую траекторию $x_i(t)$, образующую во времени многомерный случайный процесс. При этом каждая координата пространства соответствует определенному параметру элемента:

$$G = G_p \cdot U \cdot G_{\text{отк}},$$

где G_p – пространство, соответствующее набору параметров работоспособного состояния элемента, а $G_{\text{отк}}$ – неработоспособного состояния элемента.

Характеристики и показатели надежности (ПН) в соответствии с рассматриваемой моделью задаются с помощью некоторого функционала Φ , определенного на траекториях процесса $x_i(t)$. Показатель надежности φ определяется как математическое ожидание от этого функционала, т.е. $\varphi = M\Phi [x_i(t)]$.

Если определить функционал Φ таким образом, что он равен 0, если хотя бы при одном значении $\tau \leq t$ траектории пройдут через точки подмножества $G_{\text{отк}}$, и равен 1, если не пройдут, получим показатель надежности – вероятность безотказной работы элемента на интервале $[0, t]$:

$$M\Phi[x_i(t)] = P(t).$$

Обычно предполагают, что случайная величина – время работы элемента до отказа распределена по экспоненциальному закону, это позволяет записать основной закон надежности в виде

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t),$$

где λ – интенсивность отказов элемента.

Вероятностно-статистические методы обеспечили переход от качественного описания свойств надежности к исследованию их количественных характеристик, позволяющих однозначно формулировать требования к надежности вновь создаваемых объектов, рассчитывать их надежность, определять необходимые объемы проверок и испытаний для подтверждения соответствия надежности элементов требуемому уровню.

Однако по мере роста надежности изделий запаздывание, свойственное статистическим подходам к оценке и обеспечению надежности, препятствовало принятию оперативных мер по совершенствованию изделий, исключению и предотвращению недостатков их разработки и производства. Например, для проверки изделия с интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-9}$ 1/ч при доверительной вероятности 0,95 следует испытывать 1 000 изделий в течение 300 лет. Если при тех же данных продолжительность испытаний ограничить пятью месяцами, то нужный для испытаний объем выборки составит 1 млн изделий [51].

Поэтому, несмотря на значительные успехи в развитии и применении статистических методов исследования надежности изделий, значительный интерес специалистов с ранних этапов становления проявлялся к физическим методам решения задач анализа и обеспечения надежности.

Наиболее общая физическая модель возникновения отказов технического объекта базируется на следующих представлениях.

В результате воздействия внешней по отношению к объекту среды в него поступает энергия различных видов, которая накапливается и создает напряжение или нагрузку

$$E_i = \sum k_i^j e_j ,$$

где E_i – уровни энергии вида 1, 2, ..., n , подводимой к объекту; e_j – уровни энергии вида 1, 2, ..., m , запасенной в объекте; k_i^j – коэффициент преобразования, показывающий связь подводимой энергии вида i с запасенной энергией вида j .

Под воздействием запасенной энергии происходит рост объема дефектов и (или) преобразование их видов. При достижении критической величины запасенной энергии или критической величины объема дефекта в объекте наступает отказ. При этом случайный характер отказа обусловлен стохастическим характером видов и уровней нагрузок, воздействующих на объект, а также прочностных и других показателей его структурных звеньев.

Для элементов радиоэлектроники воздействующей средой являются режимы применения и условия эксплуатации, а дефекты определяются особенностями разработки и производства элементов. Характер взаимодействия этих факторов и их влияние на физико-химические процессы (механизмы) отказов являются объектом исследований при физических подходах к проблеме надежности.

Следует отметить, что физические подходы к исследованию надежности ЭРИ начали разрабатываться фактически в самых ранних работах по проблеме. В начале 50-х гг. XX в. именно с физического анализа отказавших элементов

начали свою деятельность подразделения надежности на промышленных предприятиях и в отраслевых институтах. Специалисты по надежности изучали виды отказов элементов аппаратуры, условия их эксплуатации в аппаратуре различных объектов техники, устанавливали характер влияния различных факторов на ПН элементов, разрабатывали предложения по исключению недостатков разработки и производства изделий, которые приводили к отказам при испытаниях и эксплуатации РЭС. В результате этих исследований было показано, что интенсивность отказов наиболее массово применяемых элементов увеличивается в среднем от 2 до 10 раз при увеличении коэффициента нагрузки от 0,5 до 1. В зависимости от уровня механических воздействий интенсивность отказов полупроводниковых приборов и микросхем может возрасти до 35 раз, резисторов и конденсаторов – до 25 раз, соединителей – до 15 раз.

Было показано также, что по мере развития элементной базы РЭС степень влияния режимов работы и внешних факторов на её надежность существенно возрастает.

Высокий уровень развития получили физические методы в работах, выполненных в 80-х гг. прошлого столетия. Они базировались на комплексных исследованиях физики отказов с помощью высокоточного аналитического оборудования, а организация работ обеспечивала привлечение заинтересованных специалистов различного профиля (от схемотехников, технологов, физиков и материаловедов до специалистов по ремонту и эксплуатации РЭС). Результаты систематических исследований по физическому анализу причин отказов аппаратуры и ЭРИ позволяли отрабатывать эффективные мероприятия по повышению их надежности, исключению повторяющихся видов и причин отказов (пробой, пережоги, коррозия и др.), совершенствовать методологию проведения анализа отказавших и дефектных элементов.

Выдающаяся роль в признании и становлении нового направления в науке и технике («надежность») принадлежит отечественным ученым – А.И. Бергу, Н.Г. Бруевичу, Б.В. Гнеденко, В.И. Сифорову, Б.С. Сотскову. Именно трудами этих ученых теория и практика надежности формировались как комплексные дисциплины, интегрирующие в себе достижения математики, физики, химии, экономики и кибернетики [11, 13].

Дальнейшие теоретические и практические работы в области надежности РЭС российских ученых и конструкторов (И.А. Ушаков, Я.Б. Шор, Н.А. Шишонок, Г.В. Дружинин, Б.Е. Бердичевский и др.) [8, 9, 14, 17], а также крупных руководителей – организаторов научных и практических работ в ракетно-космической и радиоэлектронных отраслях промышленности и Министерстве обороны (П.С. Плешаков, А.И. Шокин, Ю.А. Мозжорин, Л.И. Гусев, В.П. Балашов, В.Н. Сретенский, И.И. Морозов и др.) позволили создать отечественную школу надежности, занимавшую до последнего времени по основным направлениям исследований одно из ведущих мест в мире.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику тенденций в развитии технических систем, определяющих сложность задач обеспечения их надежности.
2. Назовите основные этапы развития элементной базы радиоэлектронных средств.
3. Назовите признаки физического подхода к исследованию надежности технических объектов.
4. Назовите признаки вероятностно-статистического подхода к исследованию надежности технических объектов.
5. Назовите принципиальные ограничения в использовании вероятностно-статистических подходов к анализу надежности сложных технических объектов, выпускаемых единичными экземплярами.

Глава 2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ

2.1. Обзор основных факторов

Жизненный цикл любого технического объекта состоит из стадий разработки (проектирования), изготовления и эксплуатации. На каждой из этих стадий решаются соответствующие задачи, связанные с обеспечением надежности. При этом на этапах проектирования объекта создаются условия (предпосылки) обеспечения высокой надежности (говорят, «надежность закладывается»), на этапах производства эти условия реализуются («надежность обеспечивается»), на этапах эксплуатации – «надежность поддерживается».

На каждой из перечисленных стадий жизненного цикла существует множество субъективных и объективных факторов, от которых зависит надежность объекта [15, 16].

Субъективные факторы в той или иной степени зависят от деятельности человека. К ним относят все мероприятия, связанные с выбором схемного и конструктивного решения при проектировании, выбором элементов и материалов, обеспечением нормальных (предусмотренных нормативными документами) режимов и условий применения составных частей и элементов, а также номинальных режимов и условий эксплуатации объекта.

К объективным факторам относят различные воздействия внешней среды (климатические, механические, биологические, агрессивные среды, радиационные и электромагнитные воздействия различной физической природы и др.), определяемые моделью эксплуатации (применения) объекта. Естественно, что степень воздействия этих факторов зависит от усилий человека, направленных на ослабление их негативного влияния, поэтому объективность здесь проявляется лишь в характере происхождения факторов.

По характеру действия факторы можно разделить на конструктивно-производственные и эксплуатационные (рис. 2.1). Разделение по такому признаку позволяет рационально распределить усилия в обеспечении надежности между участниками процессов создания и применения объектов.

К группе конструктивно-производственных относят факторы, определяемые техническим состоянием созданного (т.е. спроектированного и изготовленного) объекта. Их влияние на надежность аппаратуры является наиболее сильным и определяющим. Действительно, именно выбор схемных и конструктивных решений при проектировании РЭС, характеристики применяемых материалов, комплектующих изделий (Ки) и составных частей, отработанность технологии производства, эффективность контрольных операций при изготовлении и приемке готовой продукции определяют технические характеристики и надежность объекта.

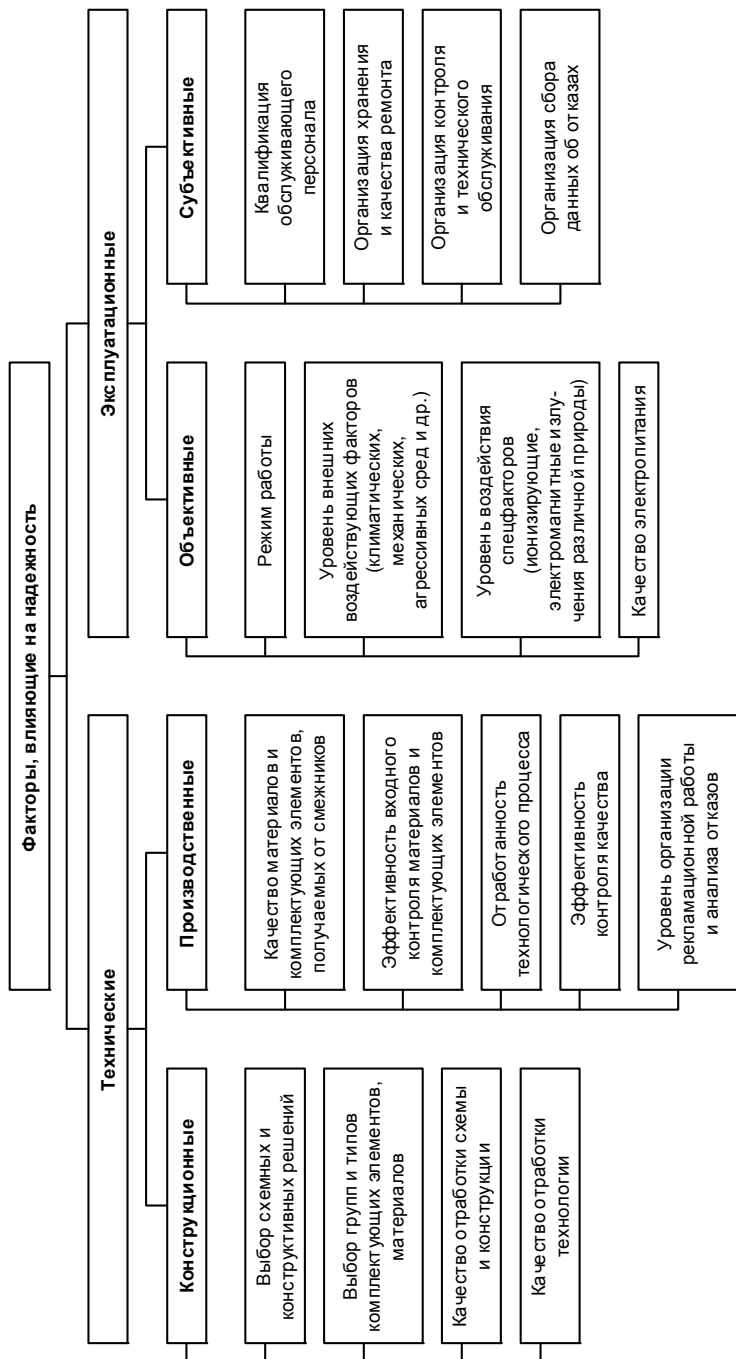


Рис. 2.1. Факторы, влияющие на надежность РЭС

К эксплуатационным относят факторы, влияющие на надежность аппаратуры и изделий в процессе их применения по назначению. Они включают в себя объективные и субъективные факторы, связанные с организацией системы технического обслуживания, ремонта РЭС, обеспечения запасными частями, квалификацией обслуживающего персонала и др.

В следующих разделах последовательно рассматриваются основные эксплуатационные факторы, влияющие на надежность комплектующих ЭРИ и РЭС.

2.2. Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность электрорадиоизделий (ЭРИ)

Отказы комплектующих ЭРИ в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) связаны с процессами, протекающими в их структурах, скорость которых зависит от характера дефектов, внесенных при разработке и изготовлении изделий, а также от режимов и условий их применения в РЭА.

Уровни показателей долговечности основных классов ЭРИ и определяющие их механизмы расходования ресурса и старения показаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Показатели долговечности основных классов ЭРИ

Класс ЭРИ	Показатели долговечности по НД на ЭРИ	Механизмы расходования ресурса и старения
Интегральные микросхемы (ИС) и полупроводниковые приборы (ПП)	Минимальная наработка от 15 000 до 150 000 ч (в облегченных режимах) Срок службы от 12 до 25 лет	Увеличение неуправляемых токов $p-n$ -переходов, дрейф коэффициентов передачи транзисторных структур, коррозионные разрушения металлизации и другие изменения параметров вследствие нарушения равновесного состояния структур приборов под воздействием температуры, разности потенциалов, агрессивных сред. Ускоряющие факторы – неидеальность исходных состояний приборов (дефекты и искажения кристаллической решетки, нарушения концентрации примесей в переходах, влага и агрессивные среды в подкорпусном объеме и др.)
Резисторы	Минимальная наработка от 25 000 до 150 000 ч (в облегченных режимах) Срок службы от 15 до 25 лет	Уходы значений сопротивлений за установленные нормы вследствие самопроизвольного перехода из метастабильного исходного состояния в более стабильное с низким уровнем внутренней энергии, связанного с атомарными перемещениями в решетке металлов. Скорость старения изменения сопротивления определяется электрической нагрузкой и температурой изделий
Конденсаторы	Минимальная наработка от 40 000 до 150 000 ч (в облегченных режимах) Срок службы от 15 до 25 лет	Уходы емкости за установленные нормы, пробой диэлектрика, обрывы, связанные с процессами электрической деструкции диэлектриков, электропереносом материалов обкладок и другими процессами, скорость которых зависит от рабочего электрического напряжения и температуры изделий

Схема взаимосвязи основных факторов, влияющих на отказы ЭРИ вследствие недостатков процессов их разработки и изготовления, дефектов исходных материалов (обуславливают конструктивно-технологические дефекты), и эксплуатационных факторов (в виде условий и режимов их применения в аппаратуре) приведена на рис. 2.2.

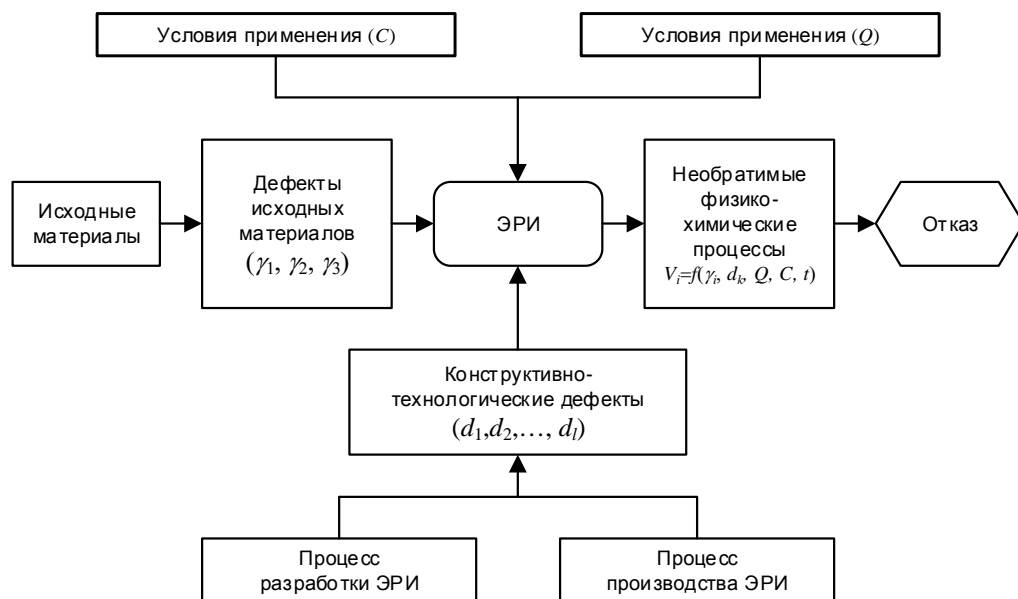


Рис. 2.2. Структурная схема взаимосвязи основных факторов, обуславливающих отказы ЭРИ

К эксплуатационным факторам, влияющим на надежность ЭРИ, относятся внешние воздействия различной физической природы, инициирующие протекание необратимых физико-химических процессов в структурах изделий. Состав внешних воздействующих факторов, которым могут подвергаться ЭРИ при их применении в аппаратуре объектов космической техники, включает:

- механические воздействия (синусоидальная и случайная широкополосная вибрация, акустический шум, механический удар одиночного и многократного действия);
- климатические воздействия (атмосферное повышенное и пониженное давление, изменение атмосферного давления, повышенная и пониженная температура среды, изменение температуры, повышенная и пониженная влажность воздуха, агрессивные среды);
- радиационные и электромагнитные воздействия источников естественного и искусственного происхождения.

Механизмы воздействия эксплуатационных факторов на ЭРИ определяются конкретными типами изделий и соответствующими особенностями их кон-

структивно-технологического исполнения. При этом, как правило, твердотельные ЭРИ достаточно устойчивы к воздействиям механических факторов и части климатических факторов, таких, например, как пониженное и повышенное атмосферное давление, но чувствительны к высокотемпературным воздействиям и ионизирующему излучению. В свою очередь электровакуумные приборы часто отказывают при механических нагрузках и сохраняют работоспособность при значительных перегревах и уровнях электромагнитных и ионизирующих излучений.

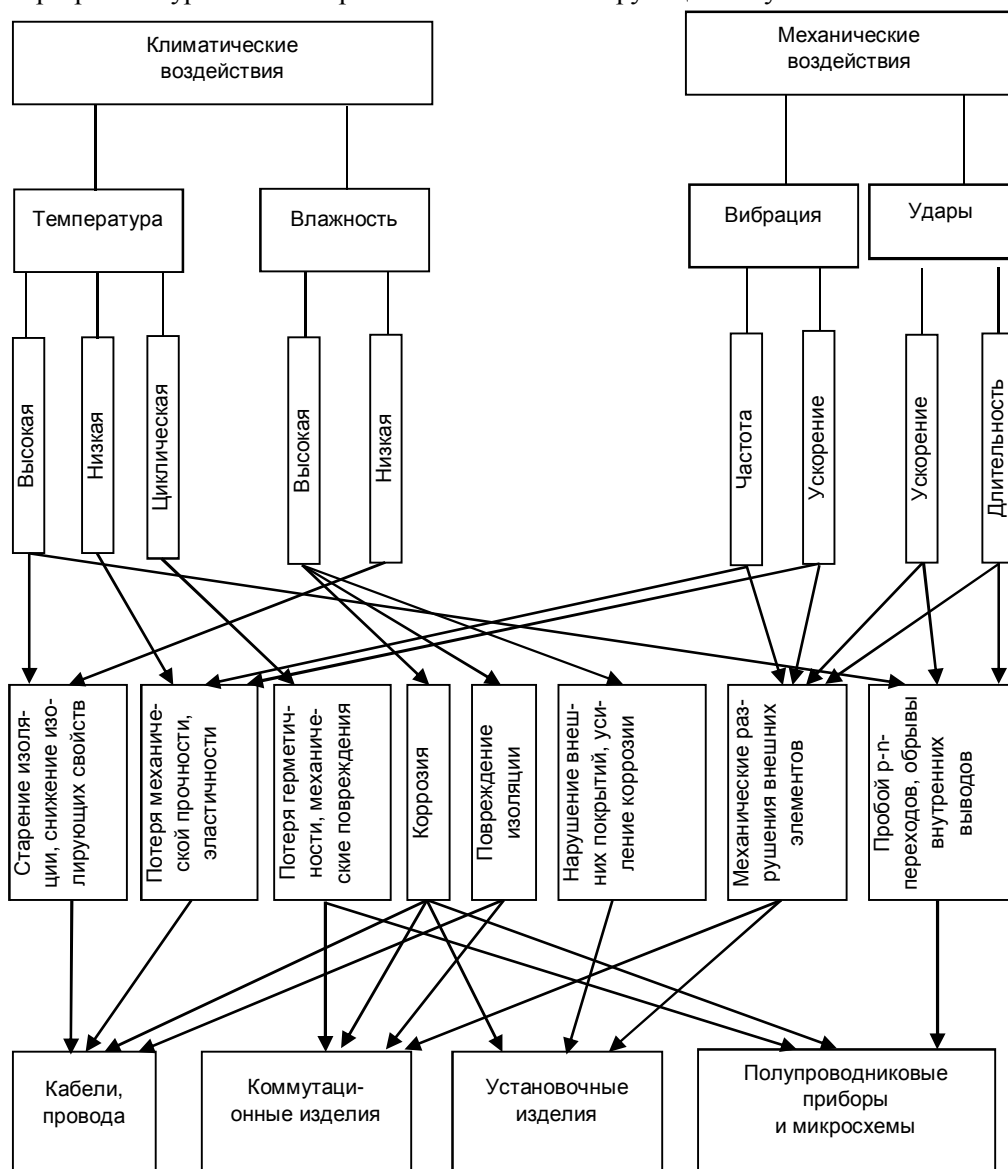


Рис. 2.3. Виды отказов ЭРИ, вызываемых воздействием внешних факторов

На рис. 2.3 представлен перечень действующих на ЭРИ эксплуатационных факторов и названы основные дефекты, инициируемые ими в конкретных видах изделий (кабели и провода, коммутационные и установочные изделия, полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы).

Выше отмечалось, что развитие элементной базы радиоэлектроники идет в направлении ее миниатюризации, т.е. снижения массогабаритных характеристик и потребляемой энергии. Мало- и микромощные ЭРИ (прежде всего интегральные микросхемы) имеют, как правило, повышенную чувствительность к воздействию внешних факторов, электрическим и технологическим воздействиям. Среди наиболее значимых факторов, влияющих на надежность интегральных микросхем (а значит, и построенных на их основе образцов аппаратуры), – температура окружающей среды и электрические нагрузки, а также факторы, определяемые особенностями схемного включения (согласованность с нагрузкой, последовательность подачи входных сигналов и подключения цепей питания и др.).

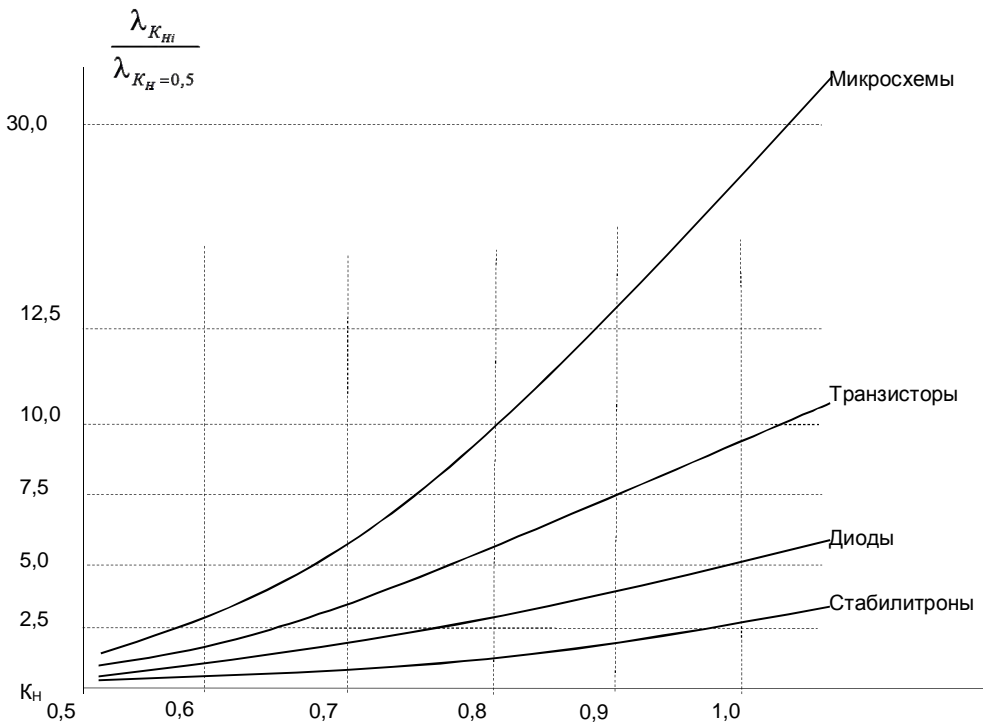


Рис. 2.4. Относительное увеличение интенсивности отказов ЭРИ при увеличении K_n

На рис. 2.4 показаны зависимости интенсивности отказов ряда групп ЭРИ от уровня электрической нагрузки [26–29]. Видно, что увеличение коэффициента

нагрузки (отношение величины фактического воздействия к предельно допустимой величине, определяемой документацией на данный тип ЭРИ) от 0,5 до 1,0 (т.е. при этом ЭРИ используются в пределах установленных норм) интенсивность отказов увеличивается более чем на порядок. Этот факт высокой чувствительности современной элементной базы к режимам применения в аппаратуре определяет необходимость тщательной отработки принимаемых при разработке аппаратуры схемных и конструктивных решений, направленных на исключение возможных перегрузок ЭРИ и обеспечение их преимущественного использования в облегченных режимах (при коэффициентах нагрузки не более 0,7–0,8).

Таблица 2.2

Зависимости интенсивности отказов ЭРИ от режимов работы

Группа ЭРИ	Воздействующий фактор	Эмпирическая формула для λ
Конденсаторы	Рабочее напряжение, U_p , В Рабочая температура, t_p° , $^\circ\text{C}$	$\lambda_0 \left(\frac{U_p}{U_n}\right)^{nk_1^{t_p^\circ - t_0^\circ}}$, где $k = 1,02-1,15$; $n = 4-10$; t_0° и U_n – номинальные режимы и условия работы конденсатора
Резисторы	Рабочая температура, t_p° , $^\circ\text{C}$ Рабочая рассеиваемая мощность, P_p , Вт	$\lambda_0 [1 + 0,02(t_p^\circ - 20^\circ)]$ $\lambda_0 \frac{P_p}{P_n}$
Реле	Число срабатываний, N	$\lambda_0 + \lambda_N \frac{N}{t}$, где λ_N – интенсивность отказов на 1 коммутацию; N/t – частота срабатываний
	Число действующих контактов, n_k	$\lambda_0 - \Delta\lambda_k \eta_t n_k$, где η_t – отношение рабочего тока к его номинальному значению; $\Delta\lambda_0$ – интенсивность отказов на 1 контакт

Эмпирические формулы, характеризующие зависимость интенсивности отказов ЭРИ различных групп от воздействия наиболее существенных для них факторов, приведены в табл. 2.2.

2.3. Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность РЭС

На надежность и отказы РЭС влияет в полном объеме совокупность эксплуатационных факторов, рассмотренная ранее применительно к комплектующим ее ЭРИ.

Естественно, что в число факторов, влияющих на надежность РЭС, должны быть включены также специфичные для них факторы, прежде всего связанные с тем, что РЭС, как правило, являются ремонтируемыми объектами. В связи с этим в состав предъявляемых к РЭС требований по надежности дополнительно

к требованиям, предъявляемым к ЭРИ (по безотказности, долговечности и сохраняемости), включаются и требования по ремонтпригодности. Эти требования обеспечиваются в первую очередь конструктивными методами, т.е. методами, применяемыми при проектировании и конструировании объектов. Вместе с тем значительное влияние на уровень обеспечения данной составляющей свойств надежности оказывают чисто эксплуатационные факторы, такие как принятая система технического обслуживания и ремонта РЭС, обеспеченность ЗИП и др. Целевая направленность рассматриваемых в настоящем издании объектов техники (объекты космической техники, в которых ремонт отказавшего оборудования в процессе эксплуатации на орбите невозможен) не позволяет рассмотреть с большей подробностью названный комплекс эксплуатационных факторов. Отметим, что теоретические и практические аспекты проблемы обеспечения ремонтпригодности системно изложены в [84].

Дальнейшее рассмотрение проблемы влияния эксплуатационных факторов на надежность РЭС проведем применительно к характерному для бортовой аппаратуры вопросу о влиянии на надежность режимов ее работы.

Различают аппаратуру непрерывного действия (постоянно включенная аппаратура каналов связи, приборы системы электроснабжения и др.), многократного циклического применения, когда периоды применения по назначению чередуются с периодами ожидания (аппаратура систем ориентации, систем коррекции и др.), а также аппаратуру однократного применения, которая до применения по назначению находится в режиме ожидания (или хранения) и вторично применена быть не может (аппаратура электромеханических систем отделения и раскрытия и др.).

Рассмотрим практически важный вопрос о влиянии временного режима и цикличности включения РЭС на ее надежность [36]. Важность этого вопроса определяется тем, что большинство видов аппаратуры КА относится к аппаратуре многократного циклического применения.

Будем считать, что суммарное количество отказов аппаратуры U_{Σ} определяется количеством отказов, возникших при ожидании $n_{ож}$, при непрерывной работе $n_{р}$ и в моменты включения-выключения $n_{в}$ аппаратуры:

$$n_{\Sigma} = n_{р} + n_{ож} + n_{в}.$$

Разделим последнее выражение на суммарное время пребывания аппаратуры во включенном состоянии $t_{н}$ и обозначим через $\Lambda = n_{\Sigma}/t_{н}$ – суммарную интенсивность отказов аппаратуры, $\lambda_{р} = n_{р}/t_{н}$ – интенсивность отказов при работе, $\lambda_{ож} = n_{ож}/t_{н}$ – соотношение между интенсивностью отказов при ожидании и при работе; $K_{д} = n_{в}/t_{н}$ – коэффициент периодичности действия ($t_{н}$ – календарная продолжительность эксплуатации); $\varepsilon = \lambda_{в}/\lambda_{р}$ – коэффициент, характеризующий прирост интенсивности отказов из-за включений-выключений аппаратуры ($\lambda_{в} = n_{в}/r$ – количество отказов на одно включение); $\kappa = r/t_{н}$ – количество вклю-

чений аппаратуры за один час работы. Получим следующее выражение для зависимости суммарной интенсивности отказов от λ_n , v , K_d , ε и κ :

$$\Lambda = \lambda_n \left(1 + v \frac{1 - K_d}{K_d} + \varepsilon \cdot \kappa \right).$$

Коэффициенты ε , v и λ_n постоянны для конкретных типов аппаратуры. Их значения обусловлены составом комплектующих ЭРИ, режимами применения, конструктивным исполнением и уровнем качества изготовления аппаратуры.

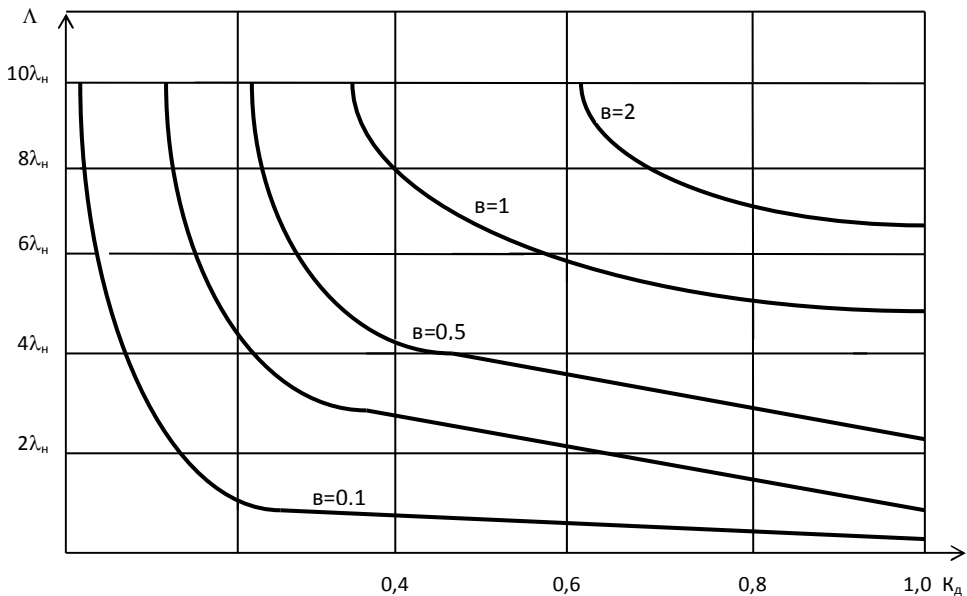


Рис. 2.5. Зависимость интенсивности отказов РЭС от коэффициента периодичности действия

Из последнего выражения следует, что $\Lambda(\kappa)$ возрастает пропорционально κ при $K_d = \text{const}$, а $\Lambda(K_d)$ убывает обратно пропорционально квадрату K_d при $\kappa = \text{const}$ (рис. 2.5). Это обстоятельство (высокая чувствительность безотказности к переходным процессам, протекающим в аппаратуре) требует принятия специальных мер при проектировании узлов и блоков аппаратуры, а также такой организации процессов ее эксплуатации, при которой минимизируется число включений и отключений электропитания.

Изложенные данные о влиянии различных факторов на надежность используются как при решении задач обеспечения надежности, так и при оценке соответствия характеристик объектов заданным требованиям, т.е. при выборе или разработке методов их испытаний.

2.4. Источники электрических перегрузок и их влияние на надежность РЭС

Описанные в предыдущих параграфах книги тенденции в развитии РЭС, связанные с повышением уровня их микроминиатюризации, выводят на одно из первых мест среди факторов, влияющих на надежность, такой фактор, как электроперегрузки (ЭП), поскольку микроминиатюрная элементная база и, следовательно, построенная на их основе аппаратура оказываются чрезвычайно чувствительными к уровням мощности и энергии электрических воздействий.

Источники электрических перегрузок	Этап изготовления ЭРИ	Этап эксплуатации ЭРИ				
		Изготовление РЭА			Эксплуатация РЭА	
		Входной контроль ЭРИ	Разработка схем, узлов РЭА	Сборка, регулировка и испытания РЭА	Комплексная отработка в составе объектов	Штатный режим эксплуатации
ЭМИ, молния						
СВЧ-излучение и разряды ЭВП						
Нестационарные процессы в системах электроснабжения						
Схемные нарушения и зависимые отказы						
Перенапряжения из-за несовершенства КПА						
Наведенное электричество						
Разряды статического электричества						

Рис. 2.6. Распределение различных видов ЭП по стадиям жизненного цикла РЭС и ЭРИ

Анализ данных об отказах микроэлектронных изделий и построенных на них РЭС показывает, что количество отказов, обусловленных воздействием ЭП, даже для существующей аппаратуры превосходит суммарное число отказов, связанных с воздействием факторов другой физической природы. Очевидно, что по мере создания и применения все более микромощных приборов и изделий указанная проблема будет обостряться. Борьба с воздействием на РЭС недопустимых ЭП может быть успешной лишь при комплексном характере ее проведения, когда на каждой стадии жизненного цикла объекта выявляются и устраняются все возможные источники ЭП.

Применительно к стадиям жизненного цикла РЭС различают следующие виды ЭП:

- перегрузки, воздействующие на РЭС и ЭРИ в процессе их производства и испытаний;
- перегрузки, воздействующие на РЭС и ЭРИ при эксплуатации.

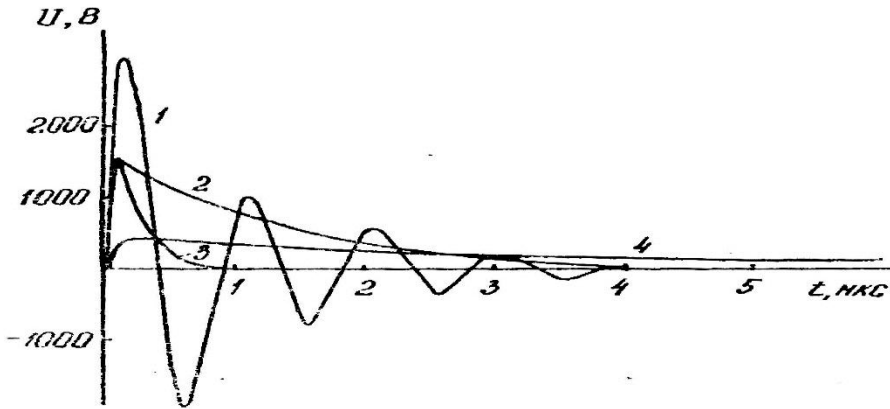


Рис. 2.7. Вид и параметры электрических перегрузок от некоторых источников
(1 – электромагнитный импульс; 2 – разряды молнии;
3 – разряды статического электричества; 4 – перегрузки от аппаратуры и оборудования)

На рис. 2.6 приведено распределение источников ЭП по стадиям и этапам жизненного цикла РЭС и ЭРИ, а на рис. 2.7 показаны параметры импульсов ЭП от некоторых источников.

2.4.1. Разряды статического и наведенного электричества

Статическое и наведенное электричество являются вездесущими природными явлениями. Суть электростатической зарядки заключается в том, что при касании двух предметов происходит перераспределение электронов между ними, в результате чего предметы получают электрические заряды противоположной полярности. Статический и наведенный заряды могут возникнуть также путём индукции.

Если предмет, заряженный статическим или наведенным электричеством, является изолятором или незаземлённым проводником, то заряд с него стекает медленно (в течение минут или часов). Поэтому и опасность возникновения разрядов статического и наведенного электричества при соприкосновении с такими предметами сохраняется в течение длительного времени.

Источниками разрядов статического и наведенного электричества являются: человек, заряженное ЭРИ, поле, наведенное в ЭРИ различными источниками электромагнитных полей.

Эквивалентная схема человека как источника разряда статического электричества, может быть представлена конденсатором C_p , заряженным до некоторого напряжения U и разряжающимся через резистор R_p на землю (рис. 2.8, *a*). Значения параметров эквивалентной схемы составляют: $C_p = 150\text{--}400$ пФ, $R_p = 0,5\text{--}1$ кОм (при разряде через кожу рук), $U = 10$ кВ. Импульс разрядного тока в такой системе имеет экспоненциально спадающую форму с начальной амплитудой $I = 10$ А и постоянной времени $\tau = 400$ нс.

Модель заряженного прибора (интегральной схемы или полупроводникового прибора) предполагает, что происходит зарядка самого прибора, его корпуса и других проводящих цепей, которые затем разряжаются на землю через один вывод. В этом случае весь заряд или его основная часть, сосредоточенная на металлических частях корпуса и кристалла, протекает через кристалл и приводит к повреждению p – n -переходов, слоёв диэлектрика и других деталей и структур, через которые проходит цепь разряда. Зарядка прибора может происходить при перемещении по различным поверхностям (тары, поддона и др.), контакте с заряженным предметом и т.д.

На рис. 2.8, *б* приведена эквивалентная схема для заряженного биполярного прибора. Она включает конденсатор емкостью C_n , индуктивность L_n и резистор сопротивлением R_n прибора, а также контактное сопротивление цепи разряда R_k . Ёмкость прибора зависит от его размеров, конструкции и ориентации относительно эквипотенциальной поверхности, принимаемой за «землю», что обуславливает её изменения при изменении положения относительно «земли». Для ИС и ПП можно считать, что $C_n = 1\text{--}20$ пФ, $L_n = 10$ нГн, $R_n = 10\text{--}20$ Ом. При касании выводом заряженного прибора заземлённой поверхности ввиду малости контактного сопротивления ($R_k \ll R_n$) постоянная времени разряда определяется параметрами ЭРИ и составляет единицы или доли наносекунд. При накопленной энергии $10\text{--}200$ мкДж это позволяет развивать в цепях разряда мощность $1\text{--}10$ кВт, что превосходит уровень необратимых разрушений структур микросхем и полупроводниковых приборов.

Модель заряженного прибора необходимо рассматривать не только для микросхем и полупроводниковых приборов, но также для печатных плат и блоков аппаратуры. В этом случае наведенный заряд на узле (блоке) оказывается более значительным. На рис. 2.8, *в* приведены упрощенные эквивалентные схемы блоков с биполярными приборами. Блок *A* не заземлен и заряжен за счет трибоэлектричества или из-за наведенных зарядов от внешних источников полей. Блок *B* не заряжен и заземлен, т.е. ключ К3 замкнут.

При сочленении разъёмного соединения первым входит в соприкосновение контакт нулевой шины (замыкается ключ К1). Весь ток уравнивания потенциалов проходит через этот контакт, и энергия рассеивается на омических сопротивлениях контуров заземления R1 и R2. Если же при сочленении разъёмного соединения первым в соприкосновение входит контакт сигнальной шины (ключ К2 замкнут, а ключ К1 разомкнут), то ток уравнивания потенциалов проходит через сигнальные цепи и создает ЭП на входящих в эти цепи приборах.

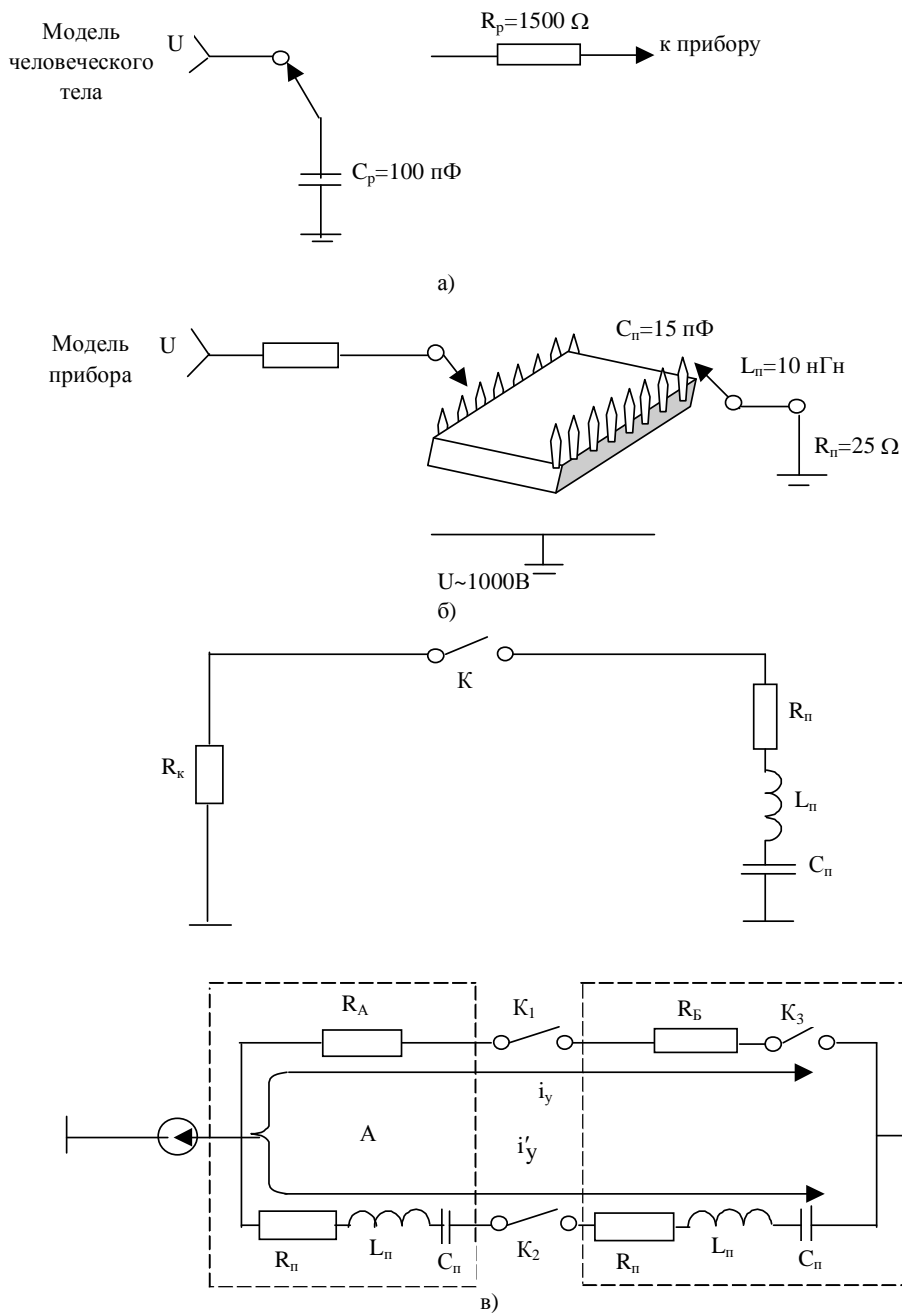


Рис. 2.8. Модели разрядов статического и наведенного электричества:
 (а – от тела человека через кожу рук; б – от отдельного заряженного ЭИИ;
 в – от заряженных блоков (узлов) аппаратуры)

Такой же результат имеет место и в случае, когда первым входит в соприкосновение контакт нулевой шины (ключ К1 замкнут), но нулевая шина блока Б оказывается незаземленной (ключ К3 разомкнут). При этом ток выравнивания потенциалов протекает лишь при замыкании контактов сигнальных цепей (ключ К2 замкнут). При расчленении блоков также происходит возникновение токов выравнивания потенциалов.

При отсутствии надёжного заземления или выхода из соприкосновения первыми контактами нулевой шины эти токи протекают через сигнальные цепи, вызывая в них ЭП.

Характерным признаком отказов ИС и ПП по рассмотренной причине является резкое возрастание доли отказов изделий, выводы которых выходят на оконечные разъёмы печатной платы или блока. Защита РЭС от ЭП такого вида обеспечивается применением обособленных (дублирующих) цепей для нулевых шин, уравнивающих потенциалы блоков, использованием для коммутации нулевых шин металлических направляющих соединений («ловителей»), применением специальных скоб и контактов в конструкциях съёмных узлов РЭС, а также устранением явлений, способствующих появлению наведенных зарядов.

При помещении ЭРИ в электрическое поле в нём наводится потенциал, равный произведению градиента потенциала на толщину структуры. Потенциал, наводимый на уединённом изделии, в большинстве случаев недостаточен для его пробоя. Однако при присоединении ЭРИ к проводникам печатной платы и блоков РЭС, действующим как антенны, потенциал значительно возрастает и может создавать опасные ЭП. Наиболее частым случаем проявления этого механизма возникновения ЭП является возникновение в сигнальных цепях незаземлённых блоков РЭС токов за счёт их емкостных связей с системами электропитания переменной частоты через источники питания, электродвигатели и др. Другой пример относится к «просачиванию» СВЧ-излучения через недостаточно «радиогерметичные» корпуса блоков РЭС.

Изложенный механизм возникновения ЭП чаще всего проявляется при сочленении и расчленении (коммутациях) разъёмных соединений съёмных устройств и узлов в процессе сборки, монтажа, а также при техническом обслуживании и ремонте РЭС, если объединение их нулевых шин осуществляется только за счёт этих же разъёмных соединений.

2.4.2. Электрические перегрузки, связанные с недостатками разработки РЭС

Основными источниками ЭП, обусловленных недостатками разработки аппаратуры, являются нарушения допустимых режимов и условий применения ЭРИ.

Методы исключения нарушений в применении ЭРИ, приводящих к недопустимым уровням воздействия на них электрических нагрузок, рассматриваются в гл. 4.

Наряду с нарушениями в выборе режимов применения ЭРИ недостаточный уровень отработки схемотехнических и конструктивных решений при разработке аппаратуры проявляется в неэффективных средствах защиты от нестационарных процессов в системах электроснабжения РЭС, от ЭП из-за бросков тока уравнивания потенциалов емкостных токов при монтаже и ремонте РЭС (рассмотрены выше), в том числе вследствие недостаточной фильтрации коротких импульсов ЭП длительностью 10^{-5} с и менее (способных вызвать повреждения структур ИС), а также от ЭП, возникающих при коммутациях нагрузки реактивного характера (обмоток реле, дросселей и др.).

Недостатки разработки аппаратуры часто проявляются также в низкой устойчивости к зависимым отказам, которая состоит в недостаточной защищённости ЭРИ от ЭП, возникающих при отказах других элементов РЭС. В этом случае значительно затрудняются диагностика и установление причины отказа РЭС, так как внешне она может проявляться как отказ бездефектного ЭРИ, работающего к тому же в облегчённом режиме. Например, если у переменного резистора возникает характерный отказ вида кратковременной потери контакта, то при включении его в цепь базы транзистора возможен пробой этого транзистора вследствие возникновения недопустимого для него режима работы «с оборванной базой». Для исключения подобных несовершенств схем и конструкции аппаратуры разработаны и применяются методы анализа видов, последствий и критичности отказов, при которых строится дерево возможных отказов каждого из элементов проектируемого объекта, оцениваются последствия отказов и определяются схемные или конструктивные меры по снижению влияния произошедшего отказа элемента на работу устройства в целом [38].

2.4.3. Электрические перегрузки, связанные с производством и испытаниями бортовых РЭС

Этот вид ЭП обусловлен недостатками схемных и конструктивных решений испытательных стендов и измерительной аппаратуры, ошибками операторов, осуществляющих монтаж, настройку, стыковку и испытания блоков и узлов бортовых РЭС.

Основными недостатками испытательных стендов и измерительной аппаратуры, влияющими на возникновение ЭП, являются неэффективная защита от бросков тока и напряжения при автоматической коммутации нагрузок, ошибки программируемых устройств, осуществляющих управление процессами испытаний.

Характерными примерами ошибок операторов, осуществляющих монтаж, настройку и регулировку блоков и узлов РЭС, их стыковку и испытания, могут служить неправильное подключение узлов и блоков РЭС, нарушения правил обращения с РЭС и ЭРИ, приводящие к возникновению ЭП из-за разрядов статического и наведенного электричества, проведение операций пайки незаземлённым паяльником или пайка заземлённым паяльником незаземлённого узла аппаратуры.

Опасность с точки зрения электрических перегрузок представляет использование осциллографов с «закрытым» входом при проверке сигналов на контрольных гнездах или контактных разъемах блоков РЭС, особенно в схемах с разноуровневым питанием. Повреждения и пробой в отдельных типах ИС (особенно в операционных усилителях) могут вызвать электрические перегрузки, возникающие при случайном замыкании (при настройке или испытаниях) выходов на «землю» или корпус РЭС. Отдельные типы ИС применяются с напряжениями источников питания различной полярности или с различной величиной напряжения на отдельные элементы (например, ЦАП или АЦП). При этом существует определенный порядок подачи питания на такие ИС, нарушив который, можно вызвать отказ. При настройке или испытаниях РЭС следует учитывать особенности таких ИС, чтобы не допускать воздействия на них электрических перегрузок и повреждений.

К ЭП, связанным с изготовлением и испытаниями РЭС, относят:

- нестационарные процессы в системах электроснабжения;
- наводки от внешних электромагнитных полей по сигнальным цепям и цепям питания;
- ошибки операторов, настраивающих и испытывающих РЭС.

Обеспечение испытательных стендов и измерительной аппаратуры электрической энергией осуществляется, как правило, системами электроснабжения (СЭС), в которых в качестве первичных источников используются как автономные электромашинные генераторы и агрегаты питания, так и сеть общего назначения. В процессе эксплуатации во всякой СЭС возможно появление нестационарных переходных процессов в виде кратковременных отклонений напряжения от их установившихся значений. Их возникновение связано с коммутацией (включением-отключением) различного электрооборудования, работающего от этой же СЭС и создающего резкое изменение токов нагрузки, а также изменением режимов работы самого источника при нормальной работе СЭС.

Разработка испытательных стендов без учёта этих процессов, происходящих в цепях электропитания при эксплуатации, приводит к появлению электрических перегрузок аппаратуры и комплектующих её ЭРИ. В зависимости от факторов, определяющих параметры нестационарных процессов, они могут быть разделены на переходные отклонения напряжения (частоты) и импульсы напряжения.

Параметры переходных отклонений напряжения (величина отклонения и его длительность), возникающих в автономных СЭС, зависят от таких факторов, как тип используемого источника электроэнергии, соотношение его мощности и коммутируемой нагрузки, быстродействие системы регулирования напряжения источника.

Переходные отклонения напряжения, наблюдаемые в процессе эксплуатации в виде провалов напряжения и перенапряжений, для СЭС постоянного тока могут изменяться в пределах от 10 до 150% номинального значения напряжения длительностью от 0,01 до 2 с.

Характер изменения напряжения при таких переходных процессах определяется в основном быстродействием системы регулирования и может быть как аperiодическим, так и колебательным.

Особенно значительные переходные отклонения напряжения в автономных СЭС возникают при ненормальных и аварийных режимах работы, когда происходят отказы регулирующих устройств источников, коротких замыканий нагрузок фаз и сети питания и соответственно их отключение. В таком режиме работы перенапряжение достигает 100–200% номинального значения напряжения.

Измерения напряжения в сети общего назначения 220/380 В показали, что с вероятностью менее 0,05 в ней также могут наблюдаться провалы напряжения до 50% номинального значения с длительностью до 12 с и перенапряжения – до 15–25% с длительностью до 1 с.

При коммутации различных нагрузок (электродвигателей, контакторов, реле и т.д.), кроме переходных отклонений напряжения, в цепях питания аппаратуры могут возникать также кратковременные импульсы напряжения. В отличие от переходных отклонений импульсы напряжений не связаны с характеристиками используемых источников электроэнергии. Их параметры (амплитуда и длительность) представляют собой случайные величины, поскольку зависят от многих факторов: волновых импедансов сети и коммутируемой нагрузки, момента коммутации по отношению к мгновенному значению напряжения, величины зазора между контактами коммутирующих устройств, при которых образуется дуга, степени отражения энергии переходного процесса в линиях электропередачи и т.д.

Исследования сети общего назначения показали, что существует большая вероятность возникновения импульсов с небольшой амплитудой (до 50 В) и малая вероятность – с очень большой амплитудой (1 000 В и более). Эмпирическая функция распределения амплитуд импульсов напряжения в сети 220 В, составленная по наблюдениям за год, приведена на рис. 2.9.

Параметры импульсов напряжения, наблюдаемые в автономных СЭС при эксплуатации различных объектов техники, находятся в диапазоне значений:

- по амплитуде – ± 50 –1 000 В;
- по длительности – от 0,1 до 10–100 мкс.

Энергия таких импульсов может достигать сотен мДж, что превышает предельную энергию разрушения многих ЭРИ. При этом наибольшая амплитуда импульсов возникает при отключении нагрузок, особенно нагрузок индуктивного характера.

Теоретически при идеальной коммутации без образования дуги амплитуда может достигать величины $I_n Z_b$, где I_n – разрываемый ток нагрузки, Z_b – волновой импеданс линии (если рассматривать переходной процесс до клемм коммутации) или нагрузки (если рассматривать переходной процесс на клеммах отключаемых нагрузок).

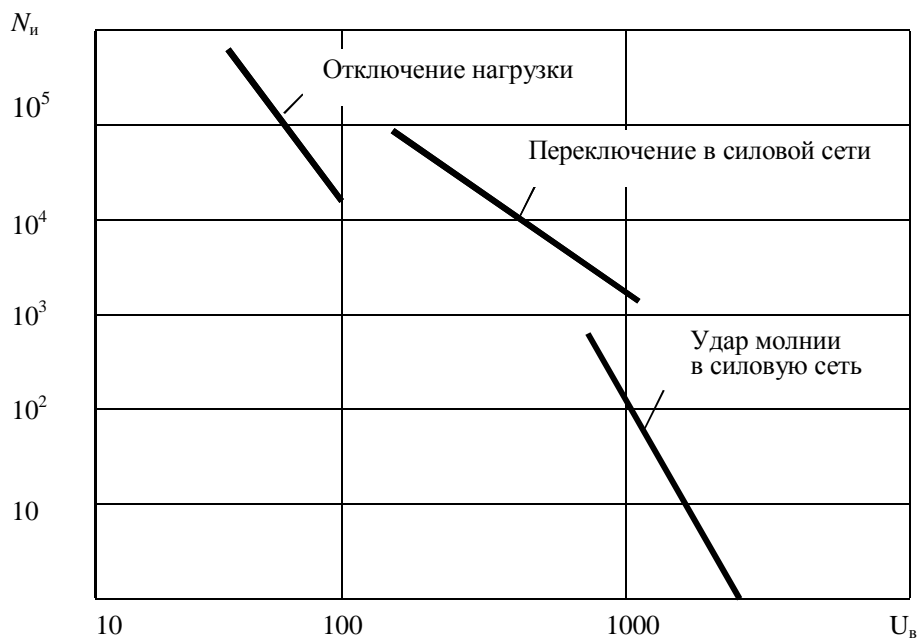


Рис. 2.9. Зависимость числа импульсов напряжения ($N_{и}$) в сети общего назначения от амплитуды импульса

Импеданс распределительных сетей различных объектов имеет значения от единиц до 300–500 Ом в широком диапазоне частот, а импеданс нагрузок может изменяться в ещё больших пределах.

2.5. Факторы радиационной природы

Ионизирующие излучения космического пространства (ИИ КП) воздействуют на бортовые РЭС КА вследствие вызываемых ими в комплектующих ЭРИ интегральных и одиночных радиационных эффектов.

Интегральные радиационные эффекты связаны с деградацией характеристик ЭРИ в результате накопления поглощенной дозы излучения (вследствие чего эти эффекты называют «дозовыми эффектами»).

Причиной возникновения одиночных радиационных эффектов является взаимодействие отдельной заряженной частицы ИИ КП с активной областью ЭРИ.

Вклад факторов радиационной природы в усложнение проблемы обеспечения требуемой долговечности КА возрастает в связи с повышением требований к продолжительности эксплуатации КА на орбитах, а также в связи с повышением чувствительности современной микроминиатюрной элементной базы к ИИ КП.

Этим объясняется рост актуальности сформировавшейся в середине прошлого века самостоятельной научно-технической дисциплины «Радиационная стойкость», предметом изучения которой являются характеристики ИИ КП, физические и химические процессы их воздействия на материалы, комплектующие ЭРИ, аппаратуру и РЭС, технологии создания радиационно стойких изделий и объектов, методы и технические средства испытаний и оценки стойкости объектов к воздействию ИИ КП.

В части 2 учебного пособия (приложения П и Р) приведены методические рекомендации по оценке стойкости бортового оборудования КА к воздействию ИИ КП по дозовым и одиночным эффектам [6]. Более полное рассмотрение перечисленных вопросов дисциплины «Радиационная стойкость» выходит за рамки настоящего пособия. Состояние исследований по теоретическим и практическим аспектам проблемы радиационной стойкости бортовой аппаратуры КА подробно освещено в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов. Применительно к КА с длительными САФ следует рекомендовать работу коллектива авторов [61].

Контрольные вопросы

1. Назовите основные стадии жизненного цикла технических объектов.
2. Назовите основные конструктивно-производственные и эксплуатационные факторы, влияющие на надежность технических объектов.
3. Расскажите об объективных и субъективных факторах, определяющих надежность технических объектов на стадии эксплуатации.
4. Разъясните взаимосвязь основных факторов, обуславливающих отказы комплектующих ЭРИ при применении в РЭС.
5. Назовите состав внешних воздействующих факторов, которым подвергаются ЭРИ в составе объектов космической техники.
6. Приведите примеры видов отказов ЭРИ, вызываемых воздействием внешних факторов.
7. Дайте характеристику влияния на надежность ЭРИ уровня термоэлектрической нагрузки.
8. Назовите основные источники электрической перегрузки ЭРИ на этапах их применения в составе РЭС.
9. Назовите основные источники разрядов статического электричества на ЭРИ и РЭС на этапах их создания и эксплуатации.
10. Дайте характеристику мощности разрядов статического электричества, накапливаемого человеком, технологическим оборудованием, приборами.
11. Назовите характерные ошибки, допускаемые техническим персоналом на этапах изготовления и испытаний аппаратуры для космических аппаратов, создающие риск ее повреждения разрядами статического электричества.

Глава 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭРИ

Технические методы обеспечения надежности РЭС принято различать по этапам их реализации: схемно-конструктивные используются при разработке, производственно-технологические – при изготовлении и эксплуатационные – в процессе применения объектов по назначению.

Рассмотрение особенностей этих методов проведем последовательно применительно к задачам обеспечения надежности комплектующих ЭРИ и РЭА.

Ранее отмечалось, что главные успехи в повышении надежности элементной базы радиоэлектронных систем связаны с ее миниатюризацией, что позволяет существенно снизить уровни рабочих напряжений, уменьшить энергопотребление (и соответственно тепловыделение), а также значительно сократить количество соединений между отдельными элементами изделий и узлов аппаратуры. С учетом этой основной тенденции в совершенствовании ЭРИ, которая объективно ведет к снижению числа «компонент ненадежности», методы обеспечения их надежности сводятся в первую очередь к повышению качества разработки, изготовления и исключению недопустимых воздействий в процессе применения. Основные направления и пути решения этих задач на стадиях жизненного цикла (ЖЦ) ЭРИ перечислены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Методы обеспечения надежности на стадиях ЖЦ

Стадии ЖЦ	Методы обеспечения надежности
Разработка	Использование надежно-ориентированных систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих проводить углубленный анализ вариантов конструктивно-технологических решений методами математического моделирования. Обеспечение производственных и эксплуатационных запасов по основным параметрам изделий, позволяющих сохранять работоспособное состояние при отклонениях режимов и условий их изготовления и применения. Проработка вопросов сопряжения электрических и конструктивных параметров изделий с другими элементами и устройствами (узлами) РЭА. Определение оптимальных условий и режимов применения изделий, при которых достигается минимальная интенсивность отказов, и включение соответствующих указаний в ТУ и руководства по применению изделий. Экспериментальная оценка эффективности принятых конструктивных и технологических решений методами граничных и провоцирующих испытаний (позволяют определить предельные возможности изделий и их «слабые места») и средствами физико-технического анализа (позволяют оценить реальное качество изготовления изделий по разработанной технологии)

Стадии ЖЦ	Методы обеспечения надежности
Производство	<p>Применение статистического контроля и статистического регулирования технологического процесса производства изделий, позволяющих предвидеть и предупреждать проблемы качества.</p> <p>«Привязка» дефектов и отказов, обнаруженных на всех стадиях изготовления изделий, к конкретной партии (обеспечение прослеживаемости «истории» изделий), обеспечивающая возможность оптимизации испытаний при приемке изделий у поставщика и на входном контроле у потребителя.</p> <p>Аттестация технологического процесса по точности, настроенности и стабильности и условиям производства.</p> <p>Применение отбраковочных испытаний (ориентированных на выявление «слабых мест» изделия) с целью отбраковки изделий со скрытыми дефектами.</p> <p>Проведение глубокого физико-технического анализа дефектных изделий для выработки эффективных корректирующих воздействий на процесс производства</p>
Приемка готовой продукции	<p>Применение гибкого (учитывающего реальное состояние процесса производства и качества изделий) приемочного контроля по качественным признакам (т.е. по признакам, не только характеризующим соответствие каждого отдельного параметра изделия установленным нормам, но и отражающим измеренные значения этих параметров и позволяющим выявить неблагоприятные тенденции процесса производства изделий).</p> <p>Обеспечение достоверности статистического контроля качества (за счет использования информации из сферы производства изделий).</p> <p>Выбор режимов испытаний, ориентированных на выявление скрытых дефектов (т.е. выбор режимов, при которых возможные скрытые производственные дефекты проявляются в виде отказов изделий).</p> <p>Применение испытаний на комплексное воздействие внешних факторов, позволяющих ускорить протекание деградационных процессов в изделиях и более точно моделировать реальные условия применения изделий</p>
Применение	<p>Обеспечение облегченных режимов работы в схемах аппаратуры, позволяющих (в зависимости от группы и класса изделий) снизить интенсивность их отказов на порядок и более.</p> <p>Защита от недопустимых технологических воздействий при производстве аппаратуры (перегревы при монтаже изделий на печатные платы, воздействия агрессивных веществ при отмывке печатных узлов и т.п.) и от воздействия внешних факторов (климатических, механических, радиационных и др.) и электроперегрузок при ее эксплуатации.</p> <p>Организация предремонтного анализа отказывающихся изделий и углубленных физико-технических исследований демонтированных из аппаратуры изделий</p>

Включенные в данную таблицу методы обеспечения надежности ЭРИ базируются на исследованиях зависимостей между конструктивно-технологическими характеристиками изделий, условиями применения и механизмами протекающих в них физико-химических процессов, приводящих к изменению параметров и отказам. Формы организации и методы выполнения указанных исследований изложены в гл. 6.

Далее рассматриваются специфические методы обеспечения надежности ЭРИ, характерные для области их космического применения. Среди этих методов:

– квалификация ЭРИ для подтверждения их соответствия заданным требованиям к надежности и условиям работы в аппаратуре (выполняется на этапах проектирования аппаратуры при выборе номенклатуры ЭРИ и установлении ограничений на допустимый уровень термоэлектрических нагрузок, при которых обеспечивается требуемая надежность);

– дополнительные испытания по специальным программам ЭРИ для исключения возможных производственных дефектов (выполняются, как правило, в специализированных испытательных центрах на этапах подготовки к изготовлению бортовой аппаратуры).

3.1. Квалификация ЭРИ по надежности

Применение ЭРИ в объектах КА с высокими требованиями к длительности САФ (на уровне 15 лет) возможно при подтверждении их долговечности на уровне не ниже 135 000–140 000 ч по минимальной наработке до отказа. Работы по проверке соответствия комплектующих ЭРИ данным требованиям в заданных условиях эксплуатации (по видам и уровням воздействия внешних факторов) называют квалификацией.

В бортовой аппаратуре спутников связи применяют ЭРИ наиболее высокого уровня качества. Применительно к ЭРИ отечественного производства – это изделия категории качества «ОС» (высшая категория) и «ВП». Для ЭРИ иностранного производства – изделия категории качества «Spase». Далее в данном разделе изложены подходы к квалификации ЭРИ отечественного производства.

Одной из составляющих работ по квалификации являются исследования по определению количественных ограничений на допустимые условия и режимы применения ЭРИ в аппаратуре, при которых достигаются требуемые долговечность и безотказность. Естественно, что данная задача должна решаться с учетом особенностей применения ЭРИ в негерметичной аппаратуре КА, находящегося на геостационарной орбите (ГСО), т.е. с учетом ухудшения условий отвода тепла от тепловыделяющих элементов вследствие отсутствия конвективной составляющей теплопереноса, что обусловлено невесомостью и вакуумом.

В общем случае ресурсные характеристики ЭРИ определяются следующими факторами:

– уровнем качества разработки изделия и конструктивно-технологическими запасами, заложенными в изделие при разработке;

– качеством изготовления и сохранением заложенных при разработке конструктивно-технологических запасов в процессе производства изделия;

– количеством и видом не выявленных операциями контроля и испытаниями скрытых дефектов, которые могут получить развитие при применении изделия;

– жесткостью условий применения, которые в конечном счете и определяют скорость процессов деградации параметров ЭРИ.

Определение рациональных режимов и условий применения ЭРИ в аппаратуре КА проводят с использованием математических моделей, устанавливающих связь между нагрузкой и интенсивностью отказов ЭРИ. В основу указанных моделей положено известное уравнение Аррениуса [85].

Далее изложены принципы установления допустимых коэффициентов нагрузки для различных классов ЭРИ.

Интегральные микросхемы

Для интегральных микросхем в качестве исходных данных используют гарантируемые техническими условиями (ТУ) данные по минимальной наработке в номинальном режиме, которые подкреплены испытаниями на долговечность при максимальной рабочей температуре в течение 3 000 ч для микросхем категории качества ВП и 4 000 ч – для категории качества ОС. Для большинства типов микросхем минимальная наработка по ТУ составляет 100 000 ч. Указанное значение наработки обеспечивается при температуре окружающей среды не более 65°C.

Для негерметичной аппаратуры, работающей в вакууме, понятие температуры окружающей среды не определено, поэтому в качестве критерия оценки теплового режима установлена температура посадочного места. Принимая во внимание экспоненциальную зависимость характеристик надежности изделий от температуры, подчиняющуюся уравнению Аррениуса, при снижении температуры посадочного места до 50°C можно получить коэффициент ускорения 50, что позволяет обеспечить с достаточной уверенностью увеличение гарантий по наработке микросхем до 150 000 ч при условии отсутствия в них скрытых конструктивно-технологических дефектов.

Ограничения на электрические режимы (напряжение питания, ток потребления, потребляемая и рассеиваемая мощность, рабочая частота) устанавливаются из условия допустимого ограничения температуры корпуса.

Область допустимых электрических нагрузок всех видов при этом ограничивается коэффициентами нагрузки в диапазоне 0,5–0,7. Приведенное снижение нагрузок имеет целью замедлить скорости деградиационных процессов и обеспечить дополнительные гарантии обеспечения ресурса. Дополнительное ограничение допустимой области работы достигается за счет ограничения допуска на питающие напряжения.

Изложенный подход близок к принятому в стандарте [76] Европейского космического агентства (ESA), но несколько отличается от него. В европейском стандарте в качестве исходной точки отсчета выбрано значение наработки при температуре кристалла 150°C. При этом коэффициенты снижения температуры задаются в виде снижения температуры кристалла на 40°C (до 110°C), что эквивалентно подтверждению возможности увеличить время наработки в 2^4 , т.е. в 16 раз по сравнению с тем, которое было подтверждено для температуры кристалла 150°C. Косвенно это может свидетельствовать о том, что ESA имеет экс-

периментальные данные (данные испытаний) по наработке в течение 8 000–10 000 ч при температуре кристалла, близкой к 150°C, по типовым представителям микросхем каждой из технологий, применяемых в бортовой аппаратуре КА.

При отсутствии отказов в процессе таких испытаний можно иметь высокую степень уверенности, что при снижении температуры на 40°C могут быть обеспечены ресурсные характеристики около 13 000–15 000 ч. Аналогичный подход изложен и в документах NASA.

Полупроводниковые приборы

Для полупроводниковых приборов допустимые коэффициенты нагрузок определяют по методологии, изложенной выше для интегральных микросхем.

В качестве исходных данных для оценки используют гарантии по минимальной наработке, приведенные в ТУ, результаты и режимы испытаний на долговечность, а также результаты ускоренных испытаний на долговечность в форсированных режимах и данные по наработке изделий в составе аппаратуры в процессе эксплуатации. Порядок расчета допустимых режимов следующий:

а) по исходным данным определяется температура перехода транзистора, при которой обеспечивается требуемая минимальная наработка;

б) для рассчитанной температуры перехода определяется (по известному для данного прибора тепловому сопротивлению переход – корпус) допустимая рассеиваемая мощность в условиях пониженного давления.

Из изложенного подхода непосредственно вытекает требование контроля теплового сопротивления при диагностическом неразрушающем контроле для мощных полупроводниковых приборов и, возможно, для некоторых приборов средней мощности, так как изменение теплового сопротивления существенно влияет на наработку прибора до отказа.

Резисторы

Для резисторов оценка допустимых коэффициентов нагрузок проводится на основе анализа допустимых нагрузок в условиях негерметичной аппаратуры с учетом действующих правил применения резисторов при разработке, изготовлении и эксплуатации аппаратуры.

Время наработки резисторов связано с допустимой температурой (мощностью рассеивания) уравнением Аррениуса, а допустимая мощность рассеивания является произведением номинальной мощности на коэффициент электрической нагрузки резистора.

При одновременном воздействии нескольких факторов, при каждом из которых мощность рассеивания резистора должна быть снижена, общий коэффициент допустимой нагрузки (K_n) определялся как произведение всех коэффициентов (по всем воздействующим факторам). Для резисторов учитываются следующие три фактора:

а) температура платы, на которую монтируется резистор;

б) уровень пониженного давления;
в) требуемая продолжительность безотказной работы (если она превышает время наработки, установленное в ТУ).

Используются зависимости K_n от температуры, приведенные в ТУ на резисторы.

В дополнение к коэффициентам электрической нагрузки для условий глубокого вакуума введены ограничения на максимально допустимое напряжение, приложенное к резисторам.

Конденсаторы

Для конденсаторов значения допустимых коэффициентов электрических нагрузок определяются с учетом температуры платы, на которую монтируется конденсатор. За основу решения задачи принимаются значения и зависимости коэффициента нагрузки от температуры, приведенные в ТУ.

Поскольку все конденсаторы имеют наработку по ТУ меньше 150 000 ч, значения допустимых коэффициентов нагрузки всегда меньше единицы.

Как и для резисторов, для высоковольтных конденсаторов вводится ограничение по напряжению при работе в условиях глубокого вакуума.

Соединители

Для соединителей допустимые коэффициенты нагрузок (по току) определяются как условия по электрической нагрузке, при которой обеспечивается требуемая наработка. Наработка соединителя определяется температурой контактной пары и значением тока, протекающего через контактную пару. В качестве исходных данных используются данные ТУ по минимальной наработке при максимальной нагрузке. Для соединителей, предназначенных для применения в условиях глубокого вакуума, должен учитываться также дополнительный перегрев, обусловленный ухудшением отвода тепла.

Проведенные оценки возможности обеспечения наработки 150 000 ч на основе использования данных ТУ, а также результатов выполненных исследований показывают, что для соединителей необходимо вводить ограничение как по коэффициенту нагрузки по току, так и по температуре. Большинство применяемых соединителей для обеспечения требуемой наработки должны иметь коэффициенты нагрузки по току не более 0,6–0,7 и температуру посадочного места не более 50–55°C. Дополнительно для высоковольтных соединителей необходимо вводить ограничение по напряжению.

Радиокомпоненты

Для трансформаторов и дросселей допустимые коэффициенты нагрузки определяют исходя из данных по наработке, приведенных в технических усло-

виях, подтвержденных результатами испытаний у изготовителя, а по некоторым изделиям – и данными, полученным из сферы их эксплуатации.

Допустимые коэффициенты нагрузки определяют как параметры режима применения, при которых возможно достижение наработки 150 000 ч. Методология оценки аналогична методологии, применяемой и для других классов ЭРИ. Она основана на пересчете подтвержденных данных по ресурсным характеристикам изделий в область облегченных режимов, что и обеспечивает уверенность в реализации требуемых значений наработки.

Полученные оценки коэффициентов нагрузки для трансформаторов и дросселей находятся в диапазоне 0,6–0,7 при ограничении температуры корпуса значением 50°C.

Реле электромагнитные маломощные

Допустимые режимы применения маломощных электромагнитных реле определяются как режимы, способные обеспечить требуемую наработку с учетом специфики эксплуатации реле в условиях глубокого вакуума. При оценке наработки рассматриваются варианты ее обеспечения за счет ресурса обмотки и контактной системы.

Обобщенным параметром, который используется для оценки наработки слаботочных реле, является температура обмотки как суперпозиция окружающей температуры (температуры посадочного места) и температуры перегрева обмотки. Перегрев обмотки определяется начальной мощностью, подаваемой на обмотку, и режимом работы реле. Оптимизируя режим работы, при прочих равных условиях, можно снижать температуру обмотки и обеспечить большие значения минимальной наработки.

Применение реле в условиях глубокого вакуума имеет свою специфику. Основными факторами, влияющими на работоспособность реле в вакууме, являются:

- а) увеличение перегрева реле;
- б) уменьшение пробивного напряжения (для реле с недостаточной степенью герметичности в результате утечки воздуха из внутреннего объема);
- в) увеличение коэффициента трения между трущимися узлами и деталями (в результате утечки воздуха из внутреннего объема);
- г) снижение коммутационных характеристик реле.

Снижение перегрева достигается путем подбора для каждого реле повторно-кратковременного (импульсного) режима работы. Без оптимизации режима применения для большинства реле наработка 150 000 ч может быть обеспечена при температуре посадочного места не выше 30–35°C.

Для длительной работы реле в вакууме должна быть обеспечена высокая степень герметичности. Для 15-летнего САФ негерметичного КА степень герметичности реле должна быть не менее 10^{-6} (л·мкм рт. ст./с).

Кроме ограничения сверху на величину тока через контакты слаботочных электромагнитных реле, существует и ограничение снизу. Для обеспечения надежной работы реле не рекомендуется их применение при величине тока менее 1 мА.

На основе теоретических и экспериментальных работ по квалификации ЭРИ выпускают перечень комплектующих, разрешенных для применения в бортовой аппаратуре конкретного КА. Форма и содержание подобного перечня (на примере одного типа ЭРИ), которым обязаны руководствоваться все разработчики и изготовителя РЭА – участники проекта создания данного КА, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Форма перечня ЭРИ, разрешенных для применения в аппаратуре КА

Тип ЭРИ, категория качества	Обозначение ТУ (спецификации)	Предприятие-изготовитель, город	Уровень ограничений по термоэлектрическим нагрузкам	Примечание (особенности монтажа и др.)
Транзистор 2Т866А ОС	ААО.339.431 ТУ ПО.070.052	ФГУП «ГЗ «Пульсар», г. Москва	Кр – не более 0,36, Т _к – не более 40°С	Стандартный монтаж на термостатированном теплоотводе

3.2. Дополнительные испытания ЭРИ

Второй важной составляющей работ по обеспечению требуемой надежности комплектующих ЭРИ для аппаратуры КА с длительными САФ являются дополнительные испытания, целью которых является исключение риска установки в аппаратуру ЭРИ с невыявленными производственными дефектами.

Под дополнительными испытаниями понимают испытания, которые выполняются сверх предусмотренных документацией на поставку ЭРИ (сверх установленных в ТУ).

Программы дополнительных испытаний формируются с учетом допущений, используемых при описанной ранее оценке пригодности конкретных типов ЭРИ для включения в перечень квалифицированных изделий, и данных о наиболее часто встречающихся видах дефектов.

Программы дополнительных испытаний ЭРИ (рис. 3.1) включают в себя:

- отбраковочные испытания (ОИ);
- диагностический неразрушающий контроль (ДНК);
- выборочный разрушающий физический анализ (РФА).

Отбраковочные испытания предназначены для выявления ЭРИ со скрытыми производственными дефектами за счет приложения внешних воздействий, провоцирующих их проявление.

Возможности отбраковочных испытаний (ОИ) по выявлению и отбраковке потенциально ненадежных ЭРИ определяются как составом и последовательно-

стью испытаний (воздействующих факторов), так и методами и параметрами испытываемых изделий, контролируемые в процессе и после испытаний.

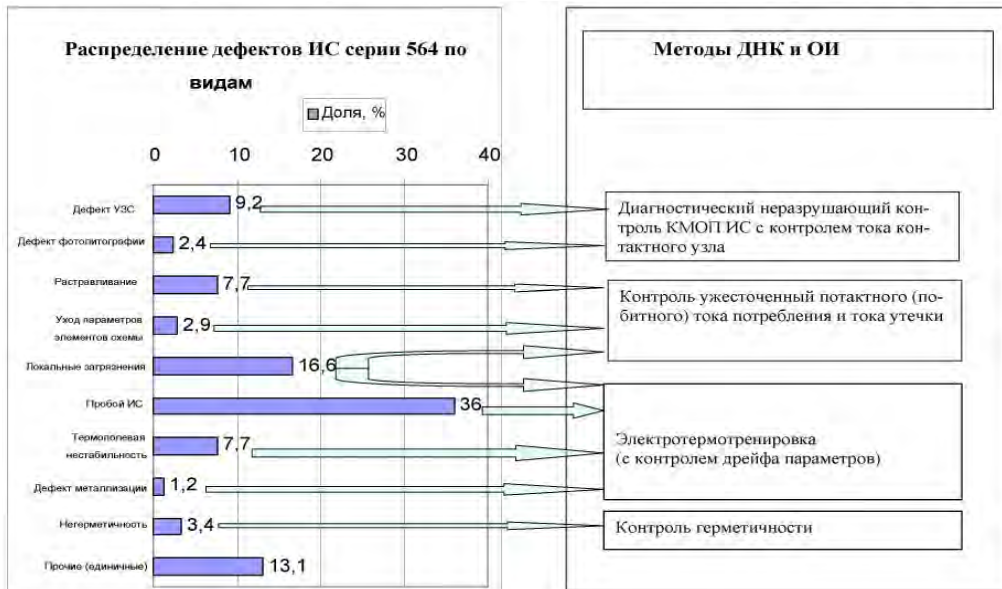


Рис. 3.1. Принципы назначения программ дополнительных испытаний ЭРИ

Для аппаратуры КА с длительным САФ важнейшей характеристикой качества ЭРИ является стабильность параметров. Поэтому в программы ОИ включают воздействия, позволяющие выявить нестабильность параметров. К таким видам воздействий относятся в первую очередь:

- электротермотренировка (ЭТТ);
- испытания на воздействия смены температур (термоциклирование).

Для интегральных микросхем продолжительность ЭТТ обычно составляет от 168 до 240 ч, а для прецизионных приборов пьезоэлектроники (кварцевые резонаторы и генераторы) от 500 до 1 000 ч.

Температурное циклирование (испытание на циклическое изменение температуры) является наиболее информативным для выявления ЭРИ, имеющих конструктивные недостатки (например, содержащие материалы с различными коэффициентами теплового расширения), а также с дефектами монтажа и сборки.

Измерения дрейфа параметров после или в процессе ОИ производятся путем сравнения значений параметров с их начальными значениями.

Параметры, для которых проводится вычисление дрейфа, определяются в зависимости от вида комплектующего ЭРИ. Разработаны и практически используются следующие общие правила назначения контролируемых параметров для основных групп ЭРИ:

- цифровые интегральные микросхемы – токи потребления (статический и динамический), токи утечки, выходные напряжения;

- линейные (аналоговые) интегральные микросхемы – ток потребления, напряжения и токи смещения, токи утечки, опорные напряжения;
- транзисторы – коэффициент передачи тока, токи утечки, напряжения насыщения;
- диоды – обратное напряжение, обратный ток;
- пассивные ЭРИ – параметры, характеризующие функциональное назначение изделий (емкость, импеданс и др.), а также параметры, характеризующие их качество (стабильность, токи утечки, величина пробивного напряжения, сопротивление контактов и др.).

В табл. 3.3 применительно к ИС приведены типовой состав методов ОИ и основные виды выявляемых при этом дефектов.

Таблица 3.3

Типовой состав отбраковочных испытаний ИС

Виды ОИ	Виды дефектов									
	Дефекты монтажа кристалла	Дефекты кристалла	Дефекты сварных контактов	Загрязнение посторонними частицами	Дефекты герметизации	Дефекты корпуса	Дефекты внешних выводов	Несоответственность температурных коэффициентов	Нестабильность ЭП	Дефекты металлизации
Термоциклирование										
Термоудар										
Постоянное ускорение										
Механический удар										
Pind-тест										
Электротермотренировка										
Повышенная влажность										

Диагностический неразрушающий контроль ЭРИ основан на определении в элементах электрофизических параметров, характеризующих их состояние и стабильность свойств во времени, и отбраковке экземпляров ЭРИ с аномальными значениями характеристик по выбранному критерию.

Для определения норм отбраковки используют:

- электрофизические модели (или параметры моделей) ЭРИ (например, m -характеристики полупроводниковых приборов и микросхем);
- физико-статистические модели ЭРИ, отражающие зависимости параметров от воздействующих факторов (напряжения питания, температуры и др.).

Наряду с диагностическими методами, основанными на использовании электрофизических параметров, применяют функционально-параметрические диагностические методы, в основе которых лежат закономерности функционирования изделий и зависимости параметров от электрических режимов. Такие методы применяются для диагностики в первую очередь функционально сложных изделий микроэлектроники. К числу таких методов относят [39]:

– метод контроля потактных (побитовых) токов микросхем на основе КМОП-структур;

– метод диагностического контроля функционирования микросхем при повышенных (пониженных) напряжениях питания;

– методы стохастического функционального контроля БИС и СБИС ОЗУ.

Для диагностики потенциально ненадежных ЭРИ применяют статистические параметрические методы. Эти методы основаны на регистрации распределения параметров ЭРИ и выделения из партии изделий с параметрами, выходящими за границы критериев, установленных на основе статистических характеристик распределения параметров. Эти методы могут называться методами контроля по «ужесточенным нормам». По существу эти методы являются разновидностью статистических методов контроля качества технологического процесса, и нормы для них могут быть установлены с использованием данных о нормах, применяемых предприятиями-изготовителями для статистического контроля техпроцесса (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Методы ДНК для ИС

Метод	Назначение, выявляемые дефекты	Применимость к группам и типам ИС
Метод контроля формы динамического тока потребления в шине металлизации	Короткие замыкания из-за проколов в окисле, электромиграция, коррозия, зарядовая нестабильность, ионное загрязнение	ИС ТТЛ, КМОП
Метод контроля параметров при пониженном напряжении питания	Температурная нестабильность выходных параметров, утечки, недостаточная нагрузочная способность выходных транзисторов, дефекты фотолитографии и защитного покрытия	Все типы ТТЛ ИС малой и средней интеграции
Метод контроля параметров в микротоковом режиме	Качество $p-n$ -переходов и изоляции по токам утечки. Качество контактных соединений. Короткие замыкания	ИС ТТЛ малой и средней интеграции
Метод определения критической величины дополнительного сопротивления в цепи питания	Качество контактных соединений, дефекты фотолитографии, окисла	МОП и КМОП, БИС, ОЗУ
Метод контроля ВАХ в характеристических точках	Загрязнения на кристалле, качество контактных соединений, дефекты фотолитографии, окисных слоев	ИС ТТЛ
Метод контроля обратного тока переходов	Контроль границы раздела «кремний – окисел» на наличие в нем примесей, однородности поверхности и толщины	ИС ТТЛ малой и средней интеграции
Метод контроля суммарного потактового (побитового) тока потребления	Зарядовая нестабильность границы раздела «кремний – окисел»	КМОП ИС малой, средней и большой интеграции, кроме ОЗУ
Метод контроля по m -характеристикам	Качество $p-n$ -перехода (поверхность и объем) по увеличению тока, связанного с рекомбинационно-генерационными центрами	ИС ТТЛ

Таблица 3.5 содержит обобщенные данные о характерных причинах забракования ЭРИ различных классов методами ОИ и ДНК [5].

Таблица 3.5

Причины забракования ЭРИ

Класс ЭРИ	Причины забракований ЭРИ
Интегральные микросхемы (цифровые)	1. Дрейф электрических параметров (ЭП) после электротермотренировки (ЭТТ), превышающий нормы. 2. Уровень потактного (побитного) тока потребления, превышающий нормы. 3. Отклонение от норм времени установления устойчивого состояния переходных процессов
Интегральные микросхемы (аналоговые)	1. Несоответствие ЭП ужесточенным нормам после ЭТТ. 2. Повышенная скорость дрейфа ЭП после ЭТТ
Транзисторы	1. Несоответствие ЭП ужесточенным нормам после ЭТТ. 2. Дрейф ЭП после ЭТТ, превышающий нормы. 3. Микроплазменный пробой
Диоды и стабилитроны	1. Несоответствие ЭП ужесточенным нормам после ЭТТ. 2. Дрейф ЭП после ЭТТ, превышающий нормы
Конденсаторы	1. Увеличение тока утечки после ЭТТ. 2. Снижение емкости после ЭТТ. 3. Нестабильность сопротивления изоляции

Повышению эффективности дополнительных испытаний ЭРИ способствует введение приемки партий ЭРИ (путем установления нормы на допустимый процент забракования ЭРИ из каждой проверяемой партии по отдельным видам проверок или по их сумме). Идея данного критерия основана на условии, что большое число забракованных ЭРИ в партии является показателем нарушения технологии изготовления и создает повышенный риск отказов изделий из данной партии.

Методы разрушающего физического анализа введены в процедуры контроля ЭРИ при их отборе вследствие выявленных фундаментальных ограничений методов диагностического неразрушающего контроля (ДНК) и отбраковочных испытаний (ОИ), которые не позволяют выявить отдельные виды скрытых производственных дефектов ЭРИ (таких как, например, интерметаллическая коррозия, повышенное содержание влаги или агрессивных сред в подкорпусном объеме микросхем и др.). В то же время именно данные виды дефектов могут привести к снижению их стойкости к воздействию ИИ и отказу при применении в аппаратуре КА.

Для получения более полной информации о качестве партии ЭРИ с учетом передового зарубежного опыта (стандарты NASA и ESA) был разработан и внедрен новый вид испытаний ЭРИ – разрушающий физический анализ (РФА), который, являясь самостоятельным видом испытаний, дополняет ОИ и ДНК и обеспечивает более полную оценку качества изделий конкретной партии.

При контроле качества партий ЭРИ, поставленных потребителю, отработаны программы РФА. Состав указанных программ и объем подвергаемых исследо-

ваниям представителей оцениваемой партии ЭРИ определялись применительно к каждому классу изделий с учетом видов дефектов, характерных для данного конструктивно-технологического исполнения ЭРИ, данных о состоянии производственного процесса на предприятии-изготовителе изделий, а также с учетом технико-экономических факторов.

Обобщенный состав и последовательность испытаний ЭРИ, выполняемых при РФА основных классов и групп ЭРИ, приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Состав испытаний при РФА

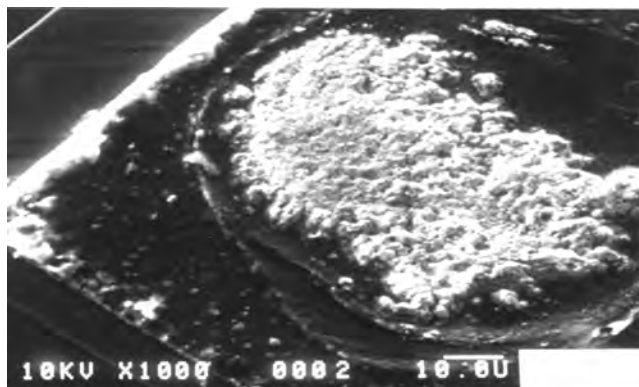
Виды испытаний при РФА	Классы ЭРИ								
	Микросхемы	Полупроводники	Резисторы	Конденсаторы	Пьезоприборы	Соединители	Реле	Радиокомпоненты	Модули СВЧ
Проверка прочности выводов	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Контроль содержания паров воды внутри корпуса	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Внутренний визуальный контроль после вскрытия корпуса	+	+	-	-	-	-	+	-	+
Контроль качества внутренних элементов конструкции с использованием растрового электронного микроскопа	+	+	-	-	-	-	+	-	-
Проверка прочности внутренних соединений	+	+	-	-	-	-	-	-	+
Испытание на сдвиг кристалла	+	+	-	-	-	-	-	-	+

К наиболее эффективным из методов и видов РФА относятся:

- контроль содержания паров воды, состава и концентрации газовой среды в подкорпусном объеме герметизированных и герметичных ЭРИ (испытания проводят с использованием масс-спектрометрического метода);

- внутренний визуальный контроль (проверка качества сборки ЭРИ, контроль качества изготовления кристаллов, исследование сварных контактов, состояние проволочных внутренних соединений, металлизации, осуществляемые при помощи методов оптической микроскопии и микрозондирования);

- контроль и исследование морфологии и структуры конструктивно-технологических элементов ЭРИ, качества обработки кремниевых пластин, металлизации, окисных пленок кристалла с помощью растрового электронного микроскопа (проверка качества и выявление дефектов окисла, металлизации, термокомпрессионного соединения на кристалле и на травере, соединения между траверсами и кристаллом, фрагменты нанесения металла на ступеньку окисла и металлизации на кристалле и др.);



1. Изделие: ИС, выполненная по КМОП-технологии

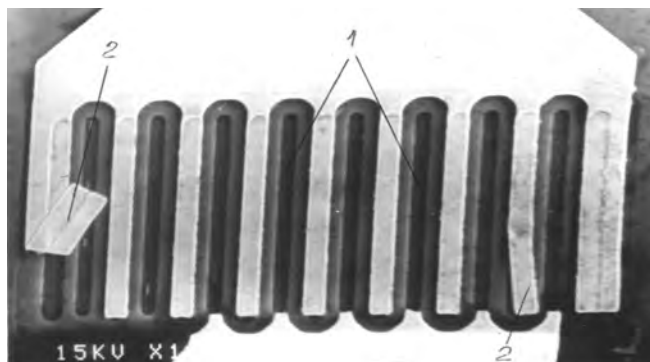
Вид дефекта: Отрыв золотого проволочного вывода на контактной площадке кристалла

Причина дефекта: Образование интерметаллических соединений в зоне термокомпрессионной сварки



2. Изделие: Диодная матрица

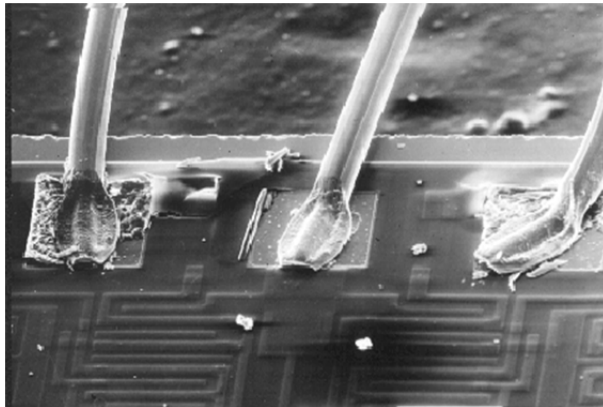
Вид дефекта: Трещины на поверхности кристалла и сколы полупроводникового материала в области приварки выводов из-за механических воздействий при приварке выводов на этапе изготовления матриц, превышающих предел прочности полупроводникового материала



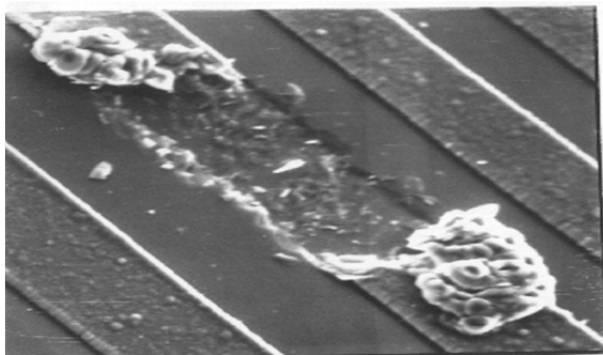
3. Изделие: Транзистор (биполярный)

Вид дефекта: Отслоение металлизации в области эмиттера по границе Al-Mo из-за нарушения режимов отмывки и вжигания Mo в Al или снижения толщины слоя Al относительно нормы, установленной в конструкторской документации

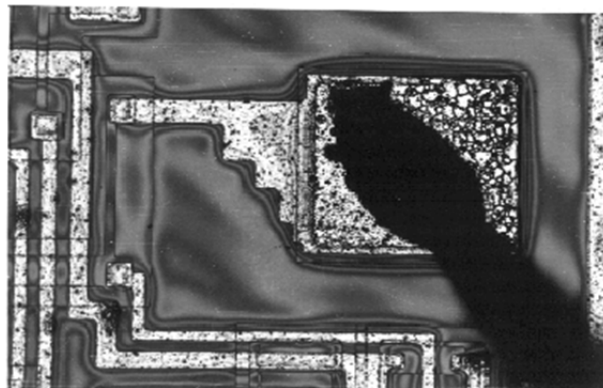
Рис. 3.2. Выявленные при РФА производственные дефекты ИС и полупроводниковых приборов



Коррозионное разрушение в области приварки золотого проволочного вывода к контактной площадке



Следы коррозионного разрушения шины металлизации



Внешний вид коррозионных разрушений, возникающих при катодной («бордюрной») коррозии

Рис. 3.3. Примеры коррозионных разрушений элементов структур ИС

– проверка прочности внутренних сварных соединений, проволочных выводов, соединений проволочных выводов с контактной площадкой кристалла или траверсами корпуса и перемычек, качества посадки кристаллов в микросхемах и полупроводниковых приборах;

– контроль распределения температуры по кристаллу, осуществляемый с помощью тепловизоров;

– контроль качества кристаллов с помощью методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Характерные производственные дефекты ЭРИ, выявляемые методами РФА, показаны на рис. 3.2, 3.3 [41].

Результаты практических работ по дополнительным испытаниям комплектующих ЭРИ описаны в части 2 книги.

Относительно новой проблемой для обеспечения разработок КА качественной элементной базой является проблема предотвращения поставки контрафактных (поддельных) электронных компонент.

Главной опасностью контрафакта является отсутствие объективных оснований для анализа исправности компонента и оценки его долговечности. Имеются данные, что даже среди компонентов, поставляемых официальными дистрибьюторами, доля контрафактной продукции достигает 7%, у независимых поставщиков эта цифра может составлять 20–30%.

Этим объясняется внимание к порядку приобретения комплектующих ЭРИ и выпуск значительного числа зарубежных нормативных и методических документов, устанавливающих правила приобретения ЭРИ на открытом рынке, требования к дистрибьюторам и рекомендации по организации входного контроля изделий [65–69].

Фальсифицированные изделия, выявленные при РФА



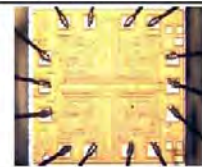



ОРИГИНАЛЫ		
2Т3117Б Завод "Транзистор", г. Минск	1Б3УД601 АО «Альфа», г. Рига	ИС 664ЛЕБ ОАО «Восход», г. Калуга
Оригинальная маркировка	Посадка кристалла на эвтектику	Оригинальная топология
		
ПОДЕЛКИ		
Фальсифицированная маркировка	Посадка кристалла на клей	Топология другого изготовителя
		

Рис. 3.4. Примеры контрафактных ЭРИ отечественного производства

Имеются многочисленные случаи поставки контрафактных ЭРИ и отечественного производства (рис. 3.4); выявление подделки в отдельных случаях возможно только при глубоком физическом анализе изделия (вскрытие корпуса, анализ структуры, топологии и др.).

В настоящее время практически единственным эффективным средством борьбы с контрафактной элементной базой является приобретение ЭРИ непосредственно у изготовителей. Способствует своевременному выявлению контрафакта также и проведение выборочного РФА отдельных экземпляров из закупленных партий ЭРИ.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы обеспечения надежности ЭРИ на этапах разработки.

2. Перечислите основные методы обеспечения надежности ЭРИ на этапах изготовления.

3. Перечислите основные методы обеспечения надежности ЭРИ на этапах приемочных испытаний и применения.

4. Дайте определение понятию «квалификация ЭРИ по надежности».

5. Приведите примеры методических подходов к проведению квалификации по надежности конкретных классов комплектующих ЭРИ, применяемых в бортовой аппаратуре КА.

6. Назовите цели проведения дополнительных испытаний ЭРИ, предназначенных для применения в КА с длительными САФ.

7. Как формируются программы дополнительных испытаний ЭРИ и их типовой состав?

8. Перечислите основные виды отбраковочных испытаний и виды выявляемых производственных дефектов интегральных микросхем.

9. Перечислите основные методы диагностического неразрушающего контроля интегральных микросхем и виды выявляемых производственных дефектов.

10. Перечислите основные виды испытаний при разрушающем физическом анализе и выявляемые дефекты интегральных микросхем.

11. Поясните, как разрушающий физический анализ ЭРИ позволяет выявить контрафактную продукцию.

Глава 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Перечень основных методов обеспечения надежности на этапах жизненного цикла РЭС приведен на рис. 4.1. Среди перечисленных – методы, имеющие организационно-техническое и физическое содержание.



Рис. 4.1. Основные методы обеспечения надежности на этапах жизненного цикла РЭС

В более полном виде пути, методы и задачи обеспечения надежности РЭС приведены в табл. 4.1. Значительная часть приведенных в данной таблице мер по своей технической сущности идентична изложенным в предыдущем подразделе применительно к комплектующим ЭРИ. Закономерность такого положения определяется тем, что по мере развития радиоэлектроники, повышения уровня интеграции микроэлектронных изделий, создания сложных комплексированных ЭРИ (микропроцессоры, модули СВЧ, вторичные источники электропитания, изделия квантовой электроники и т.п.) конструктивно-технологические границы между комплектующими электрорадиоизделиями и узлами и блоками аппаратуры становятся в значительной степени условными.

Обеспечение надежности РЭС

Стадии ЖЦ	Методы обеспечения надежности
Разработка	<p>Выбор принципа действия, обеспечивающего простоту структуры и законов функционирования разрабатываемой аппаратуры (на основе анализа альтернативных вариантов).</p> <p>Преимущественное применение наиболее отработанных и экспериментально полно проверенных схемно-конструктивных решений из предшествующих разработок.</p> <p>Выбор рациональных форм структурной, функциональной, временной и информационной избыточности и методов резервирования.</p> <p>Использование принципов построения отказоустойчивых структур, позволяющих «маскировать» отказы отдельных элементов путем их локализации и осуществления структурных перестроений аппаратуры, сохраняющих ее работоспособное состояние.</p> <p>Использование модульных принципов конструирования и других прогрессивных методов снижения количества применяемых дискретных элементов и повышение уровня микроминиатюризации аппаратуры, обеспечивающих значительное сокращение числа межсоединений.</p> <p>Преимущественное применение высоконадежных «покупных» составных частей аппаратуры и комплектующих ЭРИ, а также высококачественных материалов.</p> <p>Облегчение режимов работы и условий применения комплектующих ЭРИ путем снижения коэффициентов нагрузки и принятия конструктивных мер защиты (использование амортизаторов, теплоотводов, специальных экранов, снижающих уровни механических и тепловых воздействий, электромагнитных наводок, и др.).</p> <p>Применение схем, выходные параметры которых малочувствительны к изменениям параметров ЭРИ (использование методов автоматического управления и регулирования, кибернетических принципов управления объектами и др.).</p> <p>Анализ проектных решений методами математического моделирования с помощью САПР для своевременного (на ранних этапах проектирования) выявления и переработки тех из них, которые не обеспечивают требуемый уровень надежности при возможных разбросах параметров комплектующих ЭРИ, изменения качества электропитания, уровней внешних воздействий и т.п.</p> <p>Экспериментальный и расчетный анализы режимов и условий работы ЭРИ с учетом возможных разбросов и уходов их параметров, изменений характеристик элементов конструкции, выявление и устранение превышений допустимых уровней нагрузок на ЭРИ.</p> <p>Проведение проектных анализов надежности, включая анализ видов, последствий и критичности отказов элементов и составных частей аппаратуры, позволяющий ранжировать возможные отказы по тяжести их последствий, выявлять критичные элементы и точки единичного отказа.</p> <p>Всесторонняя проверка схемных, конструкторских и технологических решений при экспериментальной отработке (квалификации), включая испытания на надежность и стойкость к воздействию внешних факторов.</p> <p>Углубленный физико-технический анализ выявленных при испытаниях причин отказов и корректировка схемных, конструктивных и технологических решений</p>
Производство	<p>Аттестация технологических процессов, оборудования, рабочих мест, персонала.</p> <p>Технологические отбраковочные испытания составных частей и аппаратуры в целом, позволяющие выявить и исключить производственные дефекты.</p> <p>Проведение полного объема приемочных испытаний, в том числе периодических испытаний, подтверждающих стабильность процессов производства.</p> <p>Анализ причин отказов, рекламационная работа с поставщиками и потребителями, корректировка конструкции, техпроцесса, системы контроля качества</p>

Стадии ЖЦ	Методы обеспечения надежности
Эксплуатация	Соблюдение требований эксплуатационной и нормативной документации при хранении, монтаже, вводе в строй и эксплуатации. Организация подконтрольной эксплуатации с целью получения достоверных данных о наработке, отказах, проведение оперативных доработок, оценка достаточности запасных частей и др. Парирование возникающих отказов программными и аппаратными средствами

4.1. Методы резервирования

Наиболее распространенными методами повышения надежности являются реализуемые на этапах разработки РЭС методы, связанные с использованием различных форм избыточности – некоторых дополнительных средств, избыточных по отношению к их минимально-необходимому составу и количеству, которые требуются для обеспечения функционирования объекта. Этими дополнительными средствами могут быть:

- а) резервные элементы, включаемые в структуру объекта;
- б) резервные возможности в выполнении объектом или его элементом своих функций (например, в простейшем случае – использование коммутационного устройства, рассчитанного на коммутацию токов 100 А, для коммутации цепей с током 50 А);
- в) резерв времени, выделяемый для выполнения заданных функций (например, использование вычислительных средств, позволяющих решать поставленную задачу за время, меньшее, чем допустимое по условиям его работы в составе системы);
- г) резерв информации, применяемый для восстановления полезной информации в случае ее искажения или потери в процессе преобразования и передачи.

В книге ограничимся рассмотрением структурных видов введения избыточности, которые принято называть резервированием [35].

Резервирование является способом обеспечения надежности, осуществляемым путем включения в структуру объекта избыточных (резервных) элементов, которые не являются функционально необходимыми, а предназначены для замены основных (функционально необходимых) элементов в случае их отказа. Резервирование потенциально позволяет создавать объекты, надежность которых выше надежности входящих в него элементов. Естественно, что практическая реализация резервирования связана с усложнением аппаратуры, увеличением ее массы, габаритов, потребляемой энергии и повышением стоимости.

Методы резервирования принято различать по нескольким признакам (рис. 4.2).

По уровню резервирования различают: общее резервирование, когда резервируется весь объект в целом (рис. 4.3, а), и отдельное резервирование, когда ре-

зервируются отдельные элементы объекта (рис. 4.3, б). Общее резервирование является наиболее простым для реализации. Раздельное резервирование может быть осуществлено на уровне сравнительно крупных узлов и блоков, а также на уровне отдельных элементов и даже для «внутриэлементных» компонент. Раздельное резервирование, как правило, охватывает не все элементы аппаратуры, а наименее надежные из них.

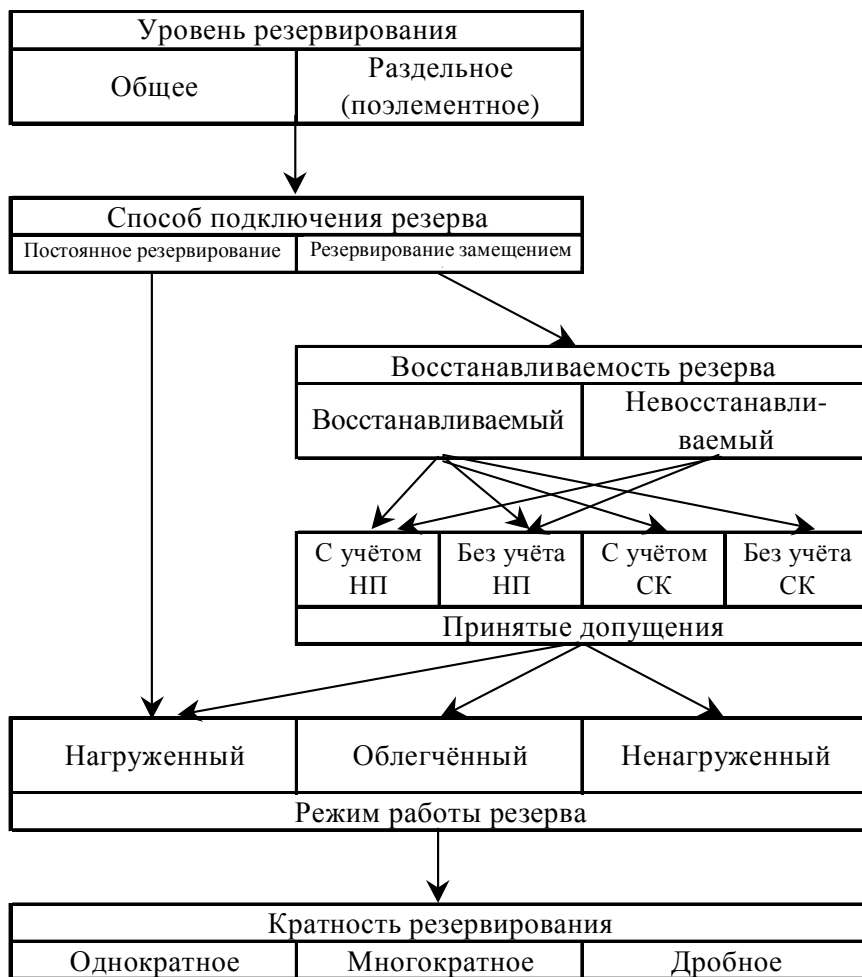


Рис. 4.2. Классификация методов резервирования
(НП – надежность переключателей; СК – средство контроля отказов)

По способу подключения резервных элементов рассматривают: постоянное резервирование, когда резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными (рис. 4.3, з), и резервирование замещением (ди-

намическое резервирование), когда функции основного элемента передаются резервному элементу только после отказа основного элемента (рис. 4.3, в).

Постоянное резервирование является единственно возможным в объектах, где недопустим даже кратковременный перерыв в работе, необходимый для перехода с основного элемента на резервный. Учитывая, что при постоянном резервировании отказавший элемент не отключается, практическая реализация данного метода резервирования требует учета видов отказов элементов и применения соответствующих схем их включения.

При резервировании замещением обычно применяют переключатели для отключения поврежденного элемента и включения резервного. Замещение может осуществляться автоматически или вручную оператором.

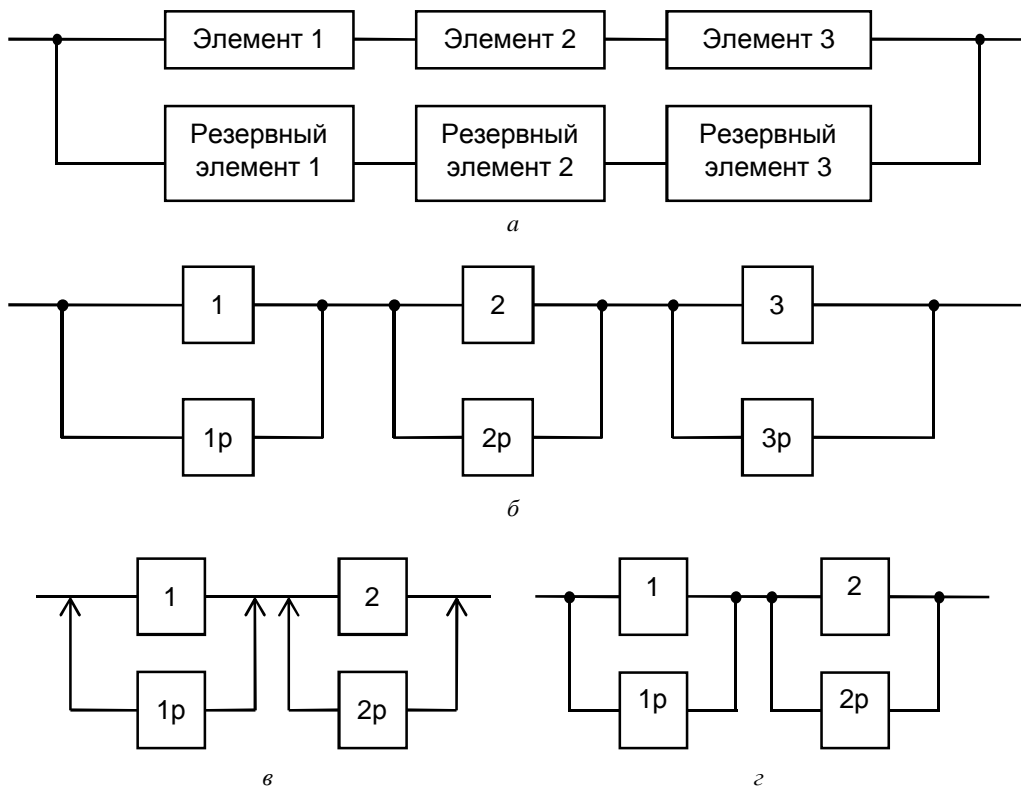


Рис. 4.3. Основные схемы резервирования

По режиму работы резервного элемента различают:

- нагруженное резервирование, когда резервный элемент находится в том же режиме работы, что и основной;
- ненагруженное резервирование, когда резервный элемент не несет нагрузку до начала выполнения им функций основного элемента;

– облегченное резервирование, при котором резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной.

Ресурс резервных элементов при нагруженном резервировании начинает расходоваться с момента включения объекта.

Постоянное резервирование, как правило, является нагруженным, это существенный недостаток данного способа резервирования, поскольку имеет место расходование ресурса резервных элементов.

Облегченный режим работы резервного элемента применяют, например, при резервировании мощных электровакуумных СВЧ-приборов, включению в работу которых должен предшествовать требующий определенного времени прогрев катодного узла. Для снижения времени выведения таких приборов (находящихся в резерве) в номинальный режим используют ждущий (облегченный) режим работы, при котором электропитание подается на катодный узел при отключенных аноде и управляющих электродах.

Способ включения резерва замещением обладает тремя основными достоинствами:

– регулировка входных и выходных параметров в момент отказа основного и включения резервного элементов в большинстве случаев не требуется;

– резервный элемент может находиться до момента включения в работу в облегченном или ненагруженном состоянии, что сохраняет ресурс элементов, повышает общую надежность резервированной системы и уменьшает расход энергии источников питания;

– имеется возможность организации восстановления отказавших основных и (или) резервных элементов, что существенно повышает надежность резервированной системы.

По кратности резервирования, под которой понимают выраженное несокращенной дробью отношение числа резервных элементов к количеству резервируемых ими основных элементов, различают: однократное и многократное резервирование, а также резервирование с дробной кратностью.

Однократное резервирование часто называют дублированием. Для большей части резервированных систем именно дублирование элементов с недостаточной надежностью находит наибольшее применение. Вместе с тем для ответственных цепей и устройств сложных технических объектов используют и большие кратности резервирования. Так, например, для ответственных систем объектов авиационной, ракетной и космической техники характерным является применение трехкратного резервирования.

Резервирование с дробной кратностью используется, например, в случаях, когда аппаратура состоит из групп однотипных блоков. Тогда для резервирования отдельных групп может использоваться один, два или несколько резервных блоков, каждый из которых подключается взамен любого из основных. Этот вид резервирования, называемый также «скользящим резервированием», позволяет достичь значительного повышения надежности при сравнительно небольшом увеличении массы и габаритов. Такой метод резервирования находит при-

менение в интегрированных источниках питания, построенных на основе однотипных транзисторных структур, число которых в одном блоке может достигать сотен единиц.

Для оценки относительной эффективности различных методов резервирования используют отношение уровней ПН, достигаемых при сравниваемых методах и равных затратах на их реализацию (по количеству резервных элементов, увеличению массы и габаритов, стоимости и т.д.).

Следует отметить, что в общем случае указать более эффективные методы резервирования из числа рассмотренных выше невозможно. Каждый из этих методов имеет области предпочтительного применения, которые зависят от особенностей функциональных характеристик резервируемых элементов или устройств, их надежности, заданных требований и ограничений на массогабаритные и другие параметры резервированных систем и пр. В то же время при выборе конкретного метода резервирования необходимо учитывать, что, как правило, эффект от резервирования увеличивается при увеличении надежности дополнительных элементов (таких как переключатели при резервировании замещением) и что раздельное резервирование элементов существенно более эффективно, чем общее; это преимущество резко возрастает с увеличением числа резервируемых элементов и кратности резервирования.

Схемы, подобные показанным на рис. 4.3, отражающие структуру объекта в виде соединений основных и резервных элементов и иллюстрирующие логическую связь между отказом отдельного элемента объекта и отказом объекта в целом, называют структурными схемами надежности (СН) объекта [82].

Далее приведена иллюстрация принципов построения резервированных бортовых систем КА на примере системы ориентации и стабилизации, содержащей несколько чувствительных приборов, включаемых в качестве основных или резервных элементов применительно к требуемым режимам работы системы.

Внешний вид и масса приборов системы ориентации и стабилизации КА показаны в табл. 4.2.



На рис. 4.4 приведена СН системы ориентации и стабилизации (СОС) в «режиме успокоения» (РУ), когда основными элементами являются ПБС и ДУС. Для обеспечения надежности режима ДУС резервирован по методу замещения.


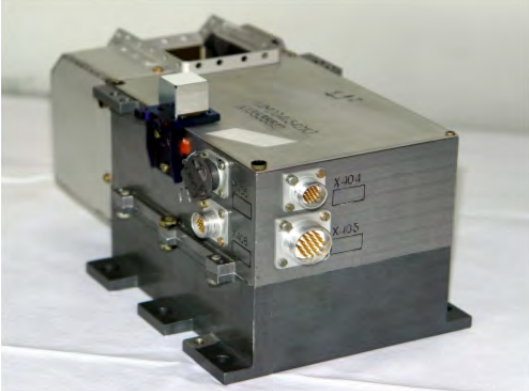

Структурная схема надежности СОС в режиме начальной ориентации на Солнце (РНОС) приведена на рис. 4.5. Здесь применено резервирование замещением каждого из двух элементов ДУС и ПОС.

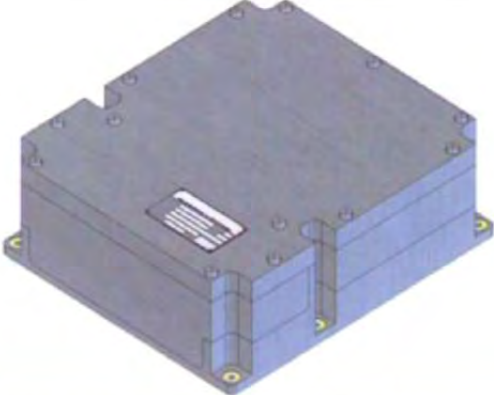
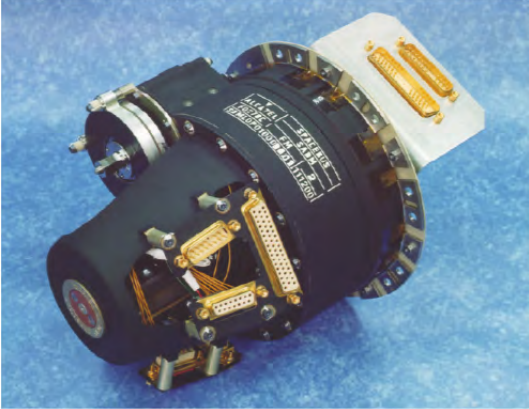
Структурная схема надежности СОС в режиме начальной ориентации на Землю (РНОЗ) дана на рис. 4.6. Здесь резервированы элементы ПОЗ, ПОС и ДУС.

Структурная схема надежности СОС в режиме трехосной стабилизации (РТС) приведена на рис. 4.7.

Приборы системы ориентации и стабилизации КА

Наименование прибора (масса прибора, кг)	Внешний вид прибора	Обозначение на схеме
Звездный прибор (3,5)	 <p>The image shows a star sensor instrument, which is a rectangular metal box with a large circular lens on the front. The lens is partially open, revealing a dark interior. A smaller cylindrical component is attached to the top of the box.</p>	ПЗВ
Электромеханический исполнительный орган (8,3×4+6,3 = 31,5)	 <p>The image shows an electromechanical actuator, which is a large, rectangular metal box with a grid of circular components on the top surface. Above the main box, four smaller circular components are shown, each mounted on a red frame, representing the individual actuators.</p>	ЭМИО

Наименование прибора (масса прибора, кг)	Внешний вид прибора	Обозначение на схеме
Прибор ориентации на Солнце (2,1)		ПОС
Прибор ориентации на Землю (1,9)		ПОЗ
Датчик направления на Солнце (0,9)		ДНС

Наименование прибора (масса прибора, кг)	Внешний вид прибора	Обозначение на схеме
Датчик угловой скорости (4,5)		ДУС
Привод батареи солнечной (9,4)		ПБС

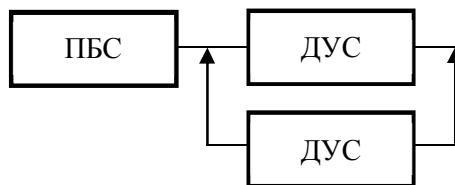


Рис. 4.4. Структурная схема надежности СОС в РУ

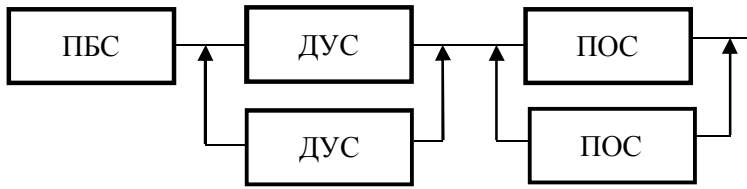


Рис. 4.5. Структурная схема надежности СОРС в РНОС

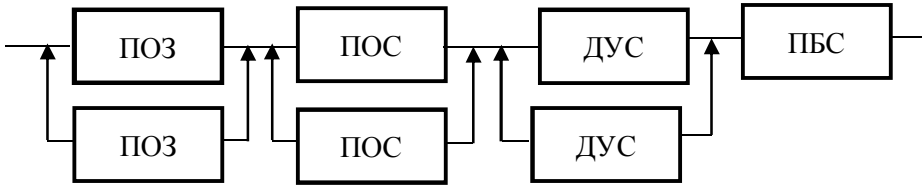
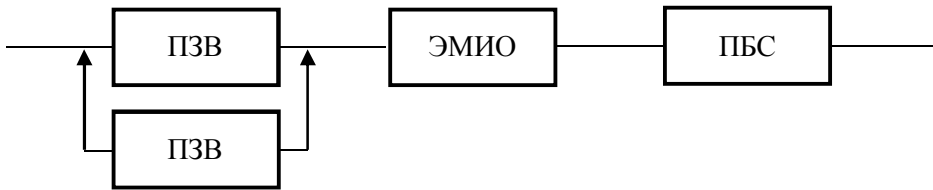


Рис. 4.6. Структурная схема надежности СОС в РНОЗ



4.7. Структурная схема надежности СОС в РТС

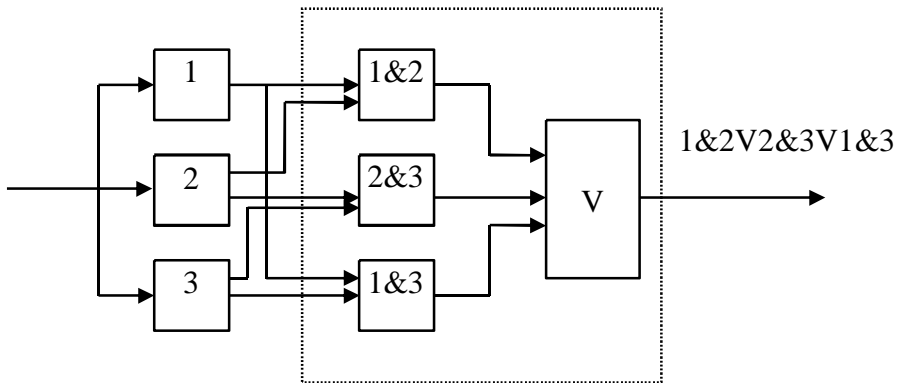


Рис. 4.8. Схема мажоритарного резервирования

Надежность СОС в режиме РТС (основной режим работы системы СОС в течение срока эксплуатации КА) обеспечивается резервированием элемента ПЗВ.

При резервировании устройств обработки информации используют так называемые мажоритарные формы резервирования. На рис. 4.8 приведен пример простейшей из них – мажоритарное резервирование по принципу «два из трех».

Здесь входной сигнал поступает на входы трех одинаковых устройств (элементы 1, 2 и 3), выходы которых соединены с мажоритарным логическим элементом. Выходной сигнал мажоритарного элемента определяется большинством значений входных величин. То есть результат работы резервированного объекта из трех включенных параллельно устройств будет считаться верным, если совпадают сигналы на выходе не менее двух из трех содержащихся в объекте устройств приема и (или) преобразования информации.

Несмотря на большое разнообразие разработанных и применяемых способов и методов резервирования, проблема создания и совершенствования эффективных методов рационального использования избыточности продолжает оставаться актуальной.

При этом необходимо учитывать, что корректная оценка эффективности резервирования в виде степени увеличения значений показателей безотказности систем (например, величины средней наработки до отказа или вероятности безотказной работы) невозможна без подтверждения факта сохранения принимаемого при расчете закона распределения отказов основного и резервных элементов в течение требуемого времени безотказной работы системы.

4.2. Проектные анализы надежности

К проектным анализам надежности оборудования, систем и КА относят:

- функциональный анализ;
- анализ надежности (безотказности, ресурса и сохраняемости);
- анализ видов, последствий и критичности отказов;
- анализ нагрузок на комплектующие элементы;
- анализ худшего случая;
- анализ нештатных ситуаций;
- анализ безопасности.

Данные анализы проводят с этапа проектирования. Как правило, они оформляются на этапе разработки рабочей документации, уточняются и используются на всех этапах разработки оборудования, систем и КА в целом.

Распределение применимости перечисленных видов анализов для оборудования, бортовых систем и КА приведено в табл. 4.3. Здесь же представлены сведения об основных отечественных и зарубежных нормативных документах, которые содержат требования и методические рекомендации по проведению анализов.

Проектные анализы надежности

Наименование анализа	Уровни анализа			Рекомендуемые методические НД
	оборудование	бортовые системы	КА	
Функциональный анализ	+	+	–	[38, 77]
Анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)	+	+	+	[38, 77]
Анализ надежности	+	+	+	[26, 28, 62, 72, 82]
Анализ нагрузок на комплектующие элементы	+	–	–	[30, 43, 76]
Анализ худшего случая	+	–	–	[84]
Анализ нештатных и аварийных ситуаций	–	+	+	[7, 8]
Анализ безопасности	+	+	+	[73]

Функциональный анализ проводят с целью определения влияния потери отдельной функции на работоспособность оборудования и системы, а также определения по каждой функции критериев допустимых потерь и общего критерия отказа оборудования и системы для использования их при проведении других анализов по обеспечению надежности.

Результаты функционального анализа помещают в таблицу (табл. 4.4).

Результаты функционального анализа

Наименование основной функции	Задействованные элементы	Наличие и вид резервирования	Последствия потери элемента

Следует уточнить структурную схему оборудования или системы во всех режимах работы и привести ее табличное описание, отразив все имеющиеся функциональные элементы, их назначение и интерфейсы между ними.

Анализ (оценку) надежности (далее – анализ надежности) проводят для оборудования, систем и КА в целом с целью подтверждения того, что показатели их безотказности (вероятность безотказной работы за САФ) будут не ниже требуемых. Рекомендации по рассмотрению отчетов с методиками и результатами анализа надежности оборудования и систем КА приведены в части 2 книги.

АВПКО проводят с целью определения возможных видов отказов для каждого элемента оборудования, системы в пределах выполняемой функции и оценки влияния каждого конкретного вида возможного отказа на заданные характеристики оборудования, системы и КА.

При АВПКО должны быть рассмотрены:

- виды отказов, вызываемые отказами оборудования;
- сбои программного обеспечения;
- отказы интерфейсного обмена между элементами;
- ошибки персонала при эксплуатации, наземных испытаниях, транспортировке и хранении.

В результате АВПКО должны быть определены:

- точки единичного отказа;
- элементы, единичный отказ в которых может распространяться и сводить на нет соответствующее резервирование или защиту;
- критичные элементы, в отношении которых должны проводиться выявление и восстановление в сроки, меньшие, чем реакция наземной станции;
- элементы, влияние единичного отказа в которых на интерфейс не допускается по ТЗ;
- отказы, вызывающие перерывы в работе;
- отказы, вызывающие снижение уровня безопасности;
- команды, несанкционированная выдача которых может привести к отрицательному воздействию;
- недостатки проекта, конструкции оборудования (если выявлены) по обеспечению заданной надежности;
- наличие соответствующих возможностей, таких как телеметрическая информация и команды управления, для определения и парирования выявленных отказов;
- способы проверки всех резервных элементов при имитации возможных видов отказов на максимально возможную глубину на соответствующих интеграционных уровнях;
- необходимые работы при эксплуатации для предотвращения и устранения отказов, включаемые в инструкции по эксплуатации.

Результаты АВПКО оборудования, систему и КА представляют в таблицах (табл. 4.5).

Т а б л и ц а 4.5

Результаты АВПКО

Функциональный блок	Функция	Элемент	Вид и причина отказа	Влияние на оборудование (систему, КА)	Внешнее проявление	Предупреждение, компенсация	Уровень критичности

К отчету по АВПКО должны прилагаться перечень критичных элементов, точек единичного отказа и программа мер по их контролю на этапах выполнения проекта.

Анализ нагрузок на комплектующие элементы проводят для электронного, электрического и электромеханического оборудования с целью сравнения фактических коэффициентов нагрузок комплектующих элементов при максимальных нагрузках в установившемся и переходных режимах, включая максимальные тепловые нагрузки, с установленными допустимыми (как правило, облегченными) значениями коэффициентов нагрузок.

Пример формы и содержания отчета по результатам анализа нагрузок приведен в табл. 4.6 (применительно к анализу нагрузок цифровых ИС).

Таблица 4.6

Результаты анализа нагрузок

Оборудование: Комплектующие:											
Поз. обозн.	Тип ЭРИ	Параметры									Соответствие
		Ток выхода, А			Мощность, Вт			Температура, °С			
Цифровые интегральные схемы											
Ки ≤ 0,8											
Биполярные											
Кр ≤ 0,75											
КМОП											
Кр ≤ 0,9											
Остальные											
Кр ≤ 0,75											
Корпуса (кристалла)											
Tmax ≤ +85(110)°С*											
Параметр по ТУ	Параметр с учетом КИ	Параметр фактический	Параметр по ТУ	Параметр с учетом Кр	Параметр фактический	Параметр по ТУ	Параметр с учетом снижения	Параметр фактический			

Анализ худшего случая проводят с целью гарантирования того, что оборудование соответствует заданным в ТЗ требованиям при наихудших условиях работы на конец САФ. Анализ проводят для критичных элементов оборудования или элементов, попадающих под требования по точности или чувствительных к условиям внешней среды.

При анализе учитывают:

– изменения параметров комплектующих элементов вследствие воздействия дестабилизирующих факторов: температуры, старения, радиации в сочетании с полным диапазоном напряжения питания, температур, нагрузок и входных сигналов;

– режимы работы в переходных процессах, включая отказы резервированных цепей, переходы с режима на режим, включение-выключение.

Результаты анализа представляют в виде таблицы (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Результаты анализа худшего случая

Наименование	Параметр	Отклонение параметров					Значение параметра по ТЗ	Соответствие
		Технологический разброс	Старение	Температура, °С	Радиация	Худший случай		

Анализ обеспечения ресурса и сохраняемости проводят на уровне оборудования с целью выявления элементов, критичных по ресурсу и сохраняемости, и определения составных частей оборудования, требующих соответствующих испытаний для подтверждения соответствия требованиям.

Рекомендации по рассмотрению отчетов с методиками и результатами анализа обеспечения ресурса и сохраняемости оборудования КА приведены в части 2 книги.

Анализ перерывов в работе (табл. 4.8) проводят для систем и КА с целью:

- выявления событий, связанных с полной или частичной потерей целевых функций систем и КА в целом;
- определения элементов, отказы и неисправности которых приводят к возникновению этих событий;
- представления данных по перерыву в работе в ходе эксплуатации для проведения анализа готовности КА;
- определения мер по минимизации возникновения перерывов в работе и их длительности.

Таблица 4.8

Результат анализа перерывов в работе

Наименование	Вид резервирования	Последствия отказов	Выявление	Восстановление	Длительность перерыва			Интенсивность или вероятность отказа
					на борту КА	по реакции НКУ, мин	общая, мин	

Анализ готовности проводят для КА по результатам анализа перерывов для оборудования и систем с целью подтверждения того, что требование технического задания по коэффициенту готовности КА будет не ниже установленного.

При анализе рассматривают два вида перерывов в работе:

- перерывы из-за отказов резервированного оборудования, компенсируемые средствами бортовой автоматики;
- перерывы из-за отказов оборудования, компенсируемые с применением средств НКУ.

Анализ нештатных и аварийных ситуаций (табл. 4.9) проводят для КА с целью определения алгоритма действий по анализу и восстановлению работоспособности КА для использования его в эксплуатационной документации по управлению КА.

При анализе рассматриваются нештатные и аварийные ситуации, устранение которых возможно только с Земли.

Т а б л и ц а 4.9

Результат анализа нештатных ситуаций

Признак ситуации	Описание ситуации	Действие по парированию ситуации	Алгоритм выхода из ситуации

Анализ безопасности (табл. 4.10) проводят для оборудования, систем с целью выявления и устранения факторов, которые могут привести к ранению или гибели персонала, повреждению или потере оборудования, а также с целью разработки мер безопасности и действий обслуживающего персонала по предотвращению и ликвидации опасных ситуаций и их последствий на всех этапах работ с оборудованием, системами:

- электрические и другие виды испытаний в организациях-изготовителях и на техническом комплексе;
- транспортирование и погрузочно-разгрузочные работы;
- ремонтные работы.

Т а б л и ц а 4.10

Результат анализа безопасности

Оборудование	Вид работ	Вид опасности	Уровень опасности	Причина возникновения	Последствие	Предупреждение	Заключение о критичности

Перечень и программа контроля критичных элементов (табл. 4.11) оформляются по результатам анализов по обеспечению надежности, а также других

проектных анализов (анализы воздействия радиации, электризации, микрометеоритных потоков и т.д.). Подразделения-разработчики оборудования, систем формируют перечень и программу контроля критичных элементов. В данные документы включают:

- точки единичного отказа и критичные элементы (из АВПКО);
- элементы, критичные по безопасности;
- элементы, критичные по ресурсу, сохраняемости (по результатам анализа ресурса и сохраняемости);
- элементы, критичные к воздействию факторов космического пространства (ФКП).

Т а б л и ц а 4.11

Перечень критичных элементов и программа контроля

Критичный элемент	Вышестоящий структурный уровень	Уровень критичности	Программа контроля	Состояние выполнения программы контроля

Рассмотренные анализы надежности позволяют:

- выявить и оценить актуальность и критичность всех проблемных вопросов по обеспечению надежности конкретных объектов (на каждом иерархическом уровне – от ЭРИ до КА в целом), применяемых и создаваемых в рамках выполняемых проектов;
- сформировать перечень предупреждающих и корректирующих действий, увязанных с этапами работ по проекту;
- продемонстрировать способность исполнителей выполнять требования к надежности создаваемых изделий.

4.3. Экспертиза правильности применения ЭРИ

Обобщение и анализ данных о причинах отказов аппаратуры показывают, что значительная часть отказов (по отдельным классам аппаратуры – до 40–50%) обусловлена принятием при их разработке таких схемных, конструктивных и технологических решений, которые приводят к недопустимым воздействиям на комплектующие ЭРИ внешних факторов (механические, климатические и др.), технологических факторов (перегревы при лужении или пайке ЭРИ, воздействие агрессивных сред при промывке или лакировке и т.п.), а также к недопустимым электрическим и тепловым режимам работы. Повышенная чувствительность современной элементной базы РЭС к указанным воздействиям делает еще более актуальной проблему своевременного (на возможно ранних этапах) выявления и исключения описанных недостатков.

С этой целью разработаны и внедрены соответствующие процедуры контроля качества разработки РЭС, осуществляемые службами контроля качества совместно с разработчиками и (при необходимости) представителями заказчика радиоэлектронных систем.

Экспертиза правильности применения ЭРИ включает [43]:

- оценку соответствия выбранной для применения номенклатуры комплектующих ЭРИ ограничительным Перечням изделий, разрешенных к применению (применительно к аппаратуре КА – соответствие перечню квалифицированных ЭРИ);

- оценку соответствия условий работы ЭРИ по уровням внешних воздействующих факторов требованиям и характеристикам, указанным в ТУ на ЭРИ;

- оценку электрических и температурных режимов работы ЭРИ;

- проверку выполнения требований НД на ЭРИ при их монтаже в аппаратуру в процессе ее изготовления.

Требования о необходимости проведения проверок правильности применения ЭРИ в разрабатываемых образцах аппаратуры введены как обязательные в государственные стандарты, регламентирующие вопросы обеспечения надежности РЭС, а основной документ, регистрирующий результаты контроля, – карты режимов работы и условий применения (КРР) ЭРИ – включен в состав конструкторской документации на все разрабатываемые образцы РЭС.

Пример формы КРР для микросборок, функциональных микросборок и микросхем приведен в виде табл. 4.12.

По форме КРР напоминает формы таблиц, заполняемых при анализе нагрузок на элементы (см. табл. 4.5). Однако КРР не могут быть заменены таблицами анализа, так как последние не содержат всего набора критериальных параметров ЭРИ, определяющих допустимые режимы работы в аппаратуре, и в связи с этим не дают гарантии достоверности выводов о соответствии режимов работы ЭРИ требованиям НД.

В КРР вносят фактические значения электрических параметров, соответствующие наиболее «тяжелым» режимам работы ЭРИ с учетом неблагоприятных изменений условий эксплуатации аппаратуры (температура, давление окружающей среды), напряжений источника питания, разбросов и сочетаний параметров сопряженных ЭРИ и источников сигналов, а также с учетом переходных процессов при включении и выключении источников питания. Фактические нагрузки на ЭРИ по каждому контролируемому параметру сравниваются с допустимыми значениями параметров, установленных в ТУ на ЭРИ, руководствах по применению и в перечне квалифицированных ЭРИ (с учетом коэффициентов снижения допустимых нагрузок для обеспечения требуемой надежности).

Экспертиза правильности применения ЭРИ позволяет на ранних этапах проектирования выявить и устранить большое число потенциальных причин отказов. Результаты экспертизы распространяются не только на обследованный объект РЭС.

Форма КРР ИС

Позиционное обозначение				
Наименование изделия				
Режим работы		Номера выводов	По НТД	В схеме
Цепи питания	Напряжение питания, В			
	Порядок подачи напряжения питания и входных сигналов			
Входные цепи	Напряжение низкого уровня, В			
	Напряжение высокого уровня, В			
	Длительность импульса, нс			
	Время перехода при включении, нс			
	Время перехода при выключении, нс			
	Частота, МГц			
	Время t_1 , нс			
	Время t_2 , нс			
Выходные цепи	Выходной ток низкого уровня, мА			
	Выходной ток высокого уровня, мА			
	Емкость нагрузки, пФ			
Мощность рассеивания, мВт				
Температура окружающей среды (корпуса), °С				
Коэффициент нагрузки				

Выявляемые при экспертизе характерные виды нарушений применения ЭРИ (см. табл. 4.13), являющиеся предпосылками их отказов, служат источником информации для разработчиков РЭС, службы надежности и контроля на аппаратостроительных предприятиях.

Т а б л и ц а 4.13

Характерные виды недостатков и нарушений в применении ЭРИ

Группа ЭРИ	Характерное нарушение	Основная причина нарушения
Аналоговые ИС	Превышение допустимых уровней напряжения питания и входных сигналов	1. Использование источников питания с допусками, большими, чем допустимо по ТУ на ИС. 2. Неправильный выбор номиналов резисторов делителя, подключаемого к ИС
	Нарушение порядка подключения источников питания ИС, использующих 2 источника (например, 5 и 12 В)	1. Нарушение инструкций по эксплуатации. 2. Несовершенство аппаратуры, используемой при наладке, регулировке и ремонте
Цифровые ИС	Превышение допустимых уровней входных и выходных сигналов	1. Неучёт различных уровней входных и выходных напряжений ИС различных серий. 2. Использование для прозвонки цепей инструмента с напряжением большим, чем допустимо по ТУ
	Превышение частоты и ёмкости нагрузки	1. Неправильный выбор динамического режима. 2. Неучёт ёмкости подводящих кабелей и элементов схем

Группа ЭРИ	Характерное нарушение	Основная причина нарушения
	Нарушение порядка подключения и снятия напряжений по цепям питания и входным цепям	1. Несовершенство аппаратуры, используемой при наладке, регулировке и ремонте. 2. Введение защиты по цепям питания ИС без отключения входных сигналов
Транзисторы	Превышение допустимой мощности рассеяния, рабочей частоты и использование схемы включения, не оговоренных НТД	1. Использование высокочастотных транзисторов в цепях стабилизаторов напряжения блоков питания без снижения $U_{к-э}$ до рекомендованных значений. 2. Работа в условиях повышенной температуры окружающей среды без снижения рассеиваемой мощности
	Превышение допустимой плотности тока (мгновенной мощности) в моменты переключения (в схеме ключа)	Разряд конденсатора фильтра или накопителя через ограничительный резистор с малым сопротивлением либо отсутствие ограничительного резистора в цепи разряда
	Превышение допустимого значения напряжения	Перераспределение напряжений на транзисторах, включённых последовательно по питанию, из-за неодновременного включения или выключения
	Превышение уровня входной мощности или напряжения	1. Отсутствие схем ограничения и защиты при наличии системы автоматической стабилизации выходной мощности уровнем возбуждения. 2. Самовозбуждение высокочастотных транзисторов в цепях линейных стабилизаторов напряжения либо в схемах эмиттерных повторителей при индуктивной реакции нагрузки
Транзисторы мощные, высокочастотные	Превышение допустимой скорости нарастания напряжения коллектор – эмиттер	Неправильный выбор динамического режима
Полупроводниковые стабилизаторы	Использование при токах стабилизации, меньших минимально допустимых по ТУ	1. Неправильный выбор номинала резистора в цепи стабилизатора. 2. Использование стабилизаторов в длительном ждущем режиме
Полупроводниковые диоды	Параллельное включение без выравняющих резисторов	Неучёт различия в величинах импедансов диодов одного типа
	Последовательное включение без параллельных выравняющих резисторов	
Конденсаторы	Превышение допустимых напряжений и частоты переменной составляющей напряжения у электролитических и оксидно-полупроводниковых конденсаторов	Неучёт удвоения частоты переменной составляющей при двухполупериодном выпрямлении однофазного тока или увеличения её в 6 раз при двухполупериодном выпрямлении трёхфазного тока

Для аппаратуры II и III поколений были разработаны инструментальные методы оценки режимов работы и условий эксплуатации ЭРИ в образцах РЭС (или в их макетах). В основу инструментальных методов положено измерение (осциллографирование) электрических сигналов, отражающих информацию о фактических режимах и условиях применения ЭРИ.

Применительно к аппаратуре IV поколения (характеризующейся высоким уровнем микроминиатюризации, сверхплотной компоновкой, применением ЭРИ с высоким быстродействием, использованием залитых и герметичных конструкций и разрабатываемых с помощью автоматизированных систем проектирования при минимальных затратах средств на макетирование) инструментальные методы определения режимов и условий применения комплектующих ЭРИ практически не применимы. Разработаны расчетные методы проверки правильности выбранных режимов и условий применения ЭРИ, которые не только заменяют инструментальные методы контроля, но и позволяют также проводить расчет экстремальных значений параметров, характеризующих электрический режим ЭРИ с учетом всех неблагоприятных факторов, рассчитывать предельно допустимые для ЭРИ значения параметров режима с учетом их зависимости от других режимных и внешних параметров [45].

С целью максимально полной реализации возможностей расчетных методов проведения технической экспертизы разработок РЭС применяют автоматизированные системы заполнения и выпуска КРП ЭРИ, которые вместе с банками данных о параметрах и характеристиках ЭРИ объединяются в автоматизированные экспертные системы.

Методология проведения технической экспертизы, отвечающая требованиям перспективных разработок РЭС, должна базироваться на комплексном моделировании физических процессов, протекающих в аппаратуре.

Различные по своей природе физические процессы, протекающие в РЭС, описываются различными математическими законами. С учетом граничных условий процедуры согласования таких разнородных процессов для их объединения в единую компьютерную модель РЭС требует неприемлемо больших, с точки зрения практики, затрат ресурсов вычислительных комплексов [47].

По мере повышения быстродействия и производительности компьютерной техники, совершенствования методов моделирования, прежде всего в направлении унификации математических моделей разнородных физических процессов, возможности автоматизированных систем анализа схемно-технических и конструктивно-технологических решений и надежности проектируемых РЭС будут расширяться.

4.3.1. Процесс проектирования РЭС с применением САПР

Процесс разработки РЭС в целом строится, как правило, на основе типовых проектных процедур. Количество процедур и их последовательность определяются спецификой РЭС и методологией проектирования, которая основывается в

настоящее время на системных принципах проектирования РЭС с применением САПР [44].

Рассмотрим маршрут автоматизированного проектирования (АП) РЭС нестационарного исполнения для самых ранних стадий их разработки. Предполагается, что РЭС выполняется в виде блока, который имеет в своём составе ряд конструктивных узлов. На приведенном маршруте (рис. 4.9) показаны проектные процедуры, связи между которыми отображаются в виде различных информационных потоков. Нумерация автоматизированных проектных процедур на схеме маршрута отражает генеральную последовательность их выполнения. Рассматриваемый маршрут ориентирован на исследование в РЭС различных физических процессов: электрических, тепловых, электромагнитных, механических, деградационных и т.п. На рис. 4.9 условно изображены информационные потоки (Дтз1–Дтз7), которые отражают как требования ТЗ к определенным характеристикам и показателям РЭС (например, электрическим, надежностным, массогабаритным и т.д.), так и уровень дестабилизирующих факторов (например, температурные и механические воздействия и т.д.).

Блок 1. На начальном этапе маршрута проектирования выполняется процедура предварительного моделирования электрических процессов, протекающих в схеме РЭС. Результаты моделирования (вектор электрических характеристик (ЭХ)) сравниваются с требованиями ТЗ, которые содержатся в информационном потоке Дтз1. Неопределенность некоторых данных на рассматриваемом этапе (отсутствие информации о локальных температурах ЭРИ, значениях паразитных параметров печатного монтажа и т.п.) снимается их заданием в первом приближении на основе личного опыта инженера-проектировщика. Позднее, когда эта информация будет получена по результатам соответствующего моделирования, осуществляется итеративная обратная связь (повторение расчётов с новыми данными, например, температурами \bar{T}_j).

Блок 2. Исходя из результатов моделирования ЭХ разрабатываемого РЭС, требований к параметрам конструкции (если есть в ТЗ), а также уровня тепловых и механических воздействий, включая мощности \bar{P}_j тепловыделений на ЭРИ, осуществляется предварительная автоматизированная разработка конструкции проектируемого устройства. В процессе разработки конструкции решаются следующие задачи: компоновка электрической схемы в типовые конструктивные узлы (разрезание схемы на части); размещение конструктивных узлов, например в блоке, с учетом тепловых, электромагнитных и механических характеристик; определение параметров корпуса блока с учетом действующих на него дестабилизирующих факторов, а также требований к массогабаритным и удельным характеристикам (обычно задаются в ТЗ) и т.п.

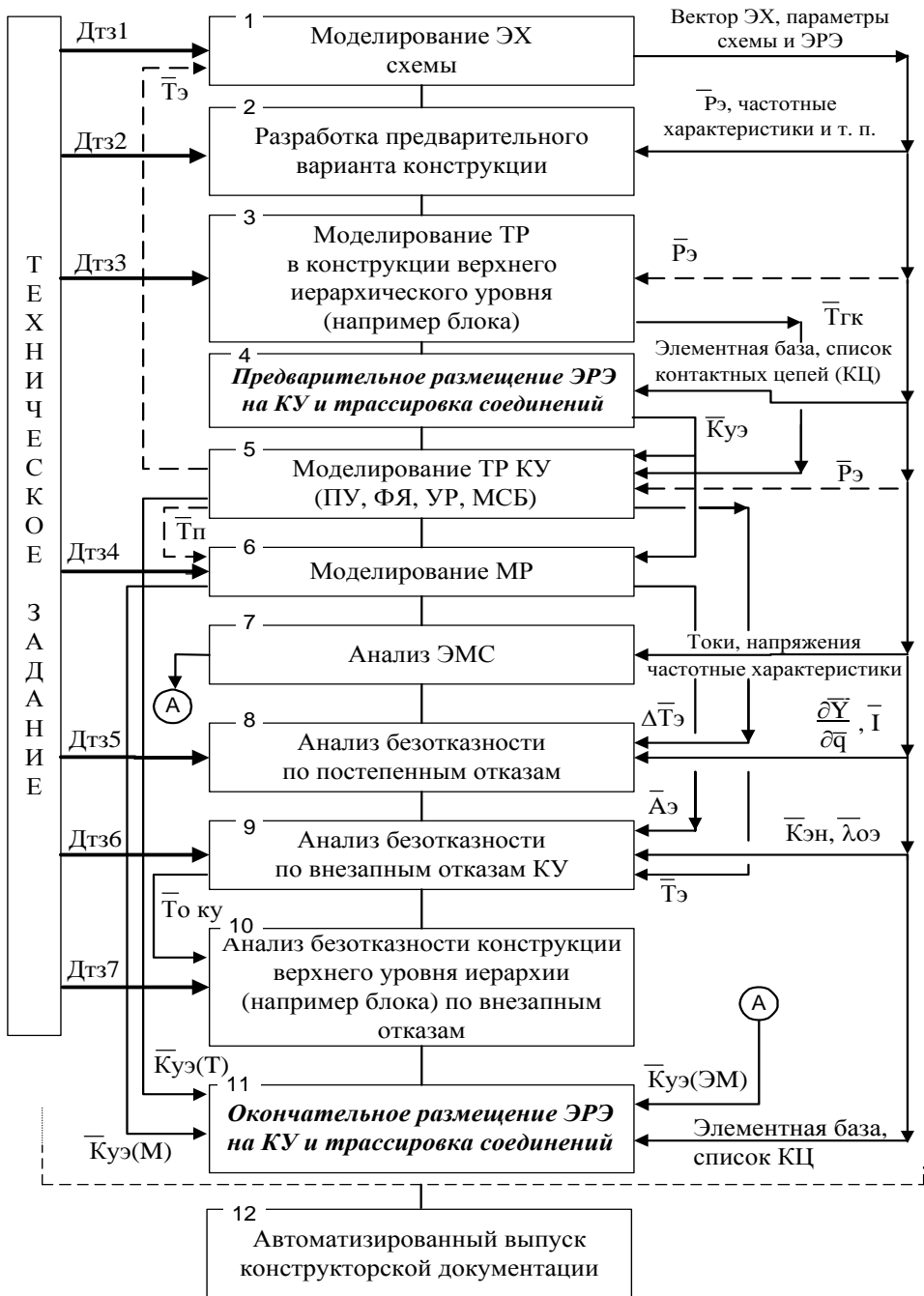


Рис. 4.9. Маршрут сквозного АП РЭС

Блок 3. Для разработанного первоначального варианта конструкции РЭС моделируется тепловой режим (ТР). Для анализа теплового режима используется макромодель всей конструкции, т.е. осуществляется контроль теплового режима конструкции самого верхнего уровня иерархии – стойки, блока или микроблока. В потоке исходной информации для моделирования теплового режима могут быть использованы данные ТЗ (информационный поток Дтз3), в качестве которых выступают воздействующие температуры окружающей среды и их временные диаграммы; допустимые перегревы или интегральные температуры отдельных конструктивных узлов или ЭРИ; вид охлаждения и его параметры и т.п.

Блок 4. Основываясь на результатах предыдущих процедур, решается в первом приближении задача размещения ЭРИ на монтажных полях конструктивных узлов (КУ), на которых реализуются соответствующие фрагменты электрической схемы. На данном этапе выполняется также предварительная трассировка печатного или пленочного монтажа.

Используемые в процессе решения перечисленных задач топологического проектирования алгоритмы и критерии определяются дестабилизирующими факторами и технологическими требованиями (класс точности изготовления печатной платы, количество слоев печатной платы), уровнем помехозащищенности и т.п.

Блок 5. С использованием результатов размещения ЭРИ на несущих конструктивах (подложках, печатных платах, основаниях функциональных ячеек и т.п.), а также вектора мощностей ЭРИ (\bar{P}_3), граничных или краевых условий (\bar{T}_{TK}), полученных в блоке 3 маршрута проектирования, осуществляется детальное моделирование тепловых режимов конструктивных узлов (печатных узлов, функциональных ячеек (ФЯ), узлов радиаторов (УР), микросборок (МСБ) и т.п.).

Блок 6. Выполняется процесс моделирования механических режимов работы проектируемой конструкции. При этом в качестве исходной информации используют данные ТЗ или частного технического задания (ЧТЗ) (поток Дтз4), которые определяют требования к резонансным частотам конструктивных узлов и элементов РЭС, а также вид механических воздействий и их параметры, включая информацию об уровнях механических воздействий в местах установки конструктивных узлов. Кроме этого, в качестве исходных данных выступают координаты установки ЭРИ (\bar{K}_y), полученные в результате размещения (см. блок 4) и скорректированные в процессе анализа и обеспечения тепловых характеристик в блоке 5, а также тепловые поля конструкции (\bar{T}_n) для возможного учета температурных зависимостей физико-механических параметров материалов и т.д.

Блок 7. Осуществляется анализ ЭМС разрабатываемого устройства. В первом приближении оценивается, например, необходимость введения экранов и их эффективность. Исходной информацией для анализа ЭМС являются конструктивные параметры устройства и его электрические характеристики (частотные характеристики, токи и напряжения в узлах схемы и т.д.).

Блок 8. На основе результатов предыдущих этапов маршрута АП (блоки 1, 3, 5, 6) осуществляются оценка безотказности устройства по постепенным отказам, допусковый анализ и т.п. Исходной информацией для данного вида анализа служат электрические характеристики (токи (\bar{I}), функции чувствительности выходных характеристик устройства к изменению параметров элементов схемы ($\partial \bar{Y} / \partial \bar{q}$) и т.д., параметры дестабилизирующих факторов, например температуры элементов (\bar{T}_s) и виброперегрузки на ЭРИ (\bar{A}_s), а также требования ТЗ к анализируемым показателям безотказности (информационный поток Дтз5).

Блоки 9–10. Выполняется анализ ПН проектируемого устройства по внезапным отказам. В качестве исходной информации для моделирования выступают коэффициенты электрической нагрузки ЭРИ ($\bar{K}_{эн}$), интенсивности отказов ЭРИ ($\bar{\lambda}_{ос}$), температуры и виброускорения ЭРИ (\bar{T}_s и \bar{A}_s), механические напряжения $\bar{\sigma}_m$ в материалах. Кроме этого, в ТЗ или в ЧТЗ регламентируют данные на показатели безотказности устройства в целом (информационный поток Дтз7), а также на отдельные конструктивные узлы (информационный поток Дтз6).

Блок 11. С учетом внесенных на предыдущих этапах маршрута АП изменений в координатах размещения ЭРИ с позиций обеспечения тепловых ($\bar{K}_{ys}(T)$) и механических ($\bar{K}_{ys}(M)$) режимов работы, анализа ЭМС ($\bar{K}_{ys}(ЭМ)$) (введение экранов), анализа ПН и качества (замена отдельных ЭРИ, введение резервирования как отдельных ЭРИ, так и функциональных узлов и т.д.) выполняется окончательное размещение ЭРИ на конструктивах с учетом закрепленных ЭРИ. Затем осуществляется процесс окончательной трассировки соединений. В результате топологического проектирования получают информацию, которая была не определена на начальных этапах проектирования. К такой информации можно отнести данные о параметрах печатного монтажа, которые в ряде случаев необходимо использовать при моделировании электрических характеристик (блок 1), а также при анализе электромагнитной совместимости (блок 7) проектируемого устройства. Учитывая, что процесс трассировки может вестись итеративно с процессом размещения дополнительных ЭРИ, необходимо повторно выполнить все вычислительные процедуры, начиная с 1-го блока. Повторное выполнение процедур позволяет также учесть в расчетах системные связи (учет

вектора \overline{T}_3 в блоке 1; учет вектора \overline{K}_3 в блоках 4 и 6; учет вектора \overline{P}_3 в блоках 3 и 5 и т.п.).

Блок 12. На заключительном этапе маршрута после итеративных расчетов осуществляется автоматизированный выпуск комплекта конструкторской документации (КД), например средствами системы AutoCAD, на проектируемое устройство. В данном блоке также выполняются операции по разработке комплекта технологической документации (ТД).

Как следует из маршрута сквозного автоматизированного проектирования РЭС (см. рис. 4.9), разработка топологии печатных плат состоит из двух взаимосвязанных основных этапов: размещение компонентов и трассировка печатных проводников. Их взаимосвязь обусловлена не только внешними факторами – механическими и тепловыми воздействиями, условиями распространения электрического сигнала, расположением и закреплением платы в блоке и т.д., но и технологией изготовления ППт и ПУ, конструкторско-технологическими нормами на проектирование.

К хорошо отработанным процедурам автоматизированного топологического проектирования можно отнести:

- компоновку (упаковка частей схемы в типовые конструктивные единицы);
- размещение (размещение конструктивных узлов или ЭРИ на монтажном пространстве несущей конструкции – блока, печатной платы, подложки, кристалла – по определённым критериям);
- трассировку (определение конкретных геометрических параметров печатного, плёночного или проводного монтажа, реализующего соединения между элементами схемы).

В общем случае можно выделить следующую последовательность процедур проектирования печатных узлов, успешно решаемых с применением САПР:

1. Анализ ЧТЗ на разработку платы.
2. Выбор класса точности и шага координатной сетки.
3. Выбор типа ППт, ее габаритов и материала основания.
4. Выбор и расчёт элементов печатного рисунка ППт.
5. Размещение электрорадиоизделий.
6. Исследование путем математического моделирования различных физических процессов (тепловых, механических, электромагнитных).
7. Трассировка печатных элементов, уточнение типа ППт, класса точности и габаритов.
8. Выбор конструкционных покрытий.
9. Анализ показателей надежности.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы обеспечения надежности РЭС на этапах их разработки.
2. Перечислите основные методы обеспечения надежности РЭС на этапах их изготовления.
3. Перечислите основные методы обеспечения надежности РЭС на этапах их применения.
4. Назовите основные формы избыточности, применяемые для повышения надежности РЭС при их проектировании.
5. Приведите известные принципы классификации методов резервирования.
6. Дайте определения понятию «кратность резервирования».
7. Перечислите проектные анализы надежности и их распространение на бортовое оборудование, бортовые системы и КА с длительными САФ.
8. Сформулируйте цели проведения анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО).
9. Сформулируйте цели проведения проектного расчета надежности РЭС.
10. Сформулируйте цели проведения проектного анализа нагрузок на ЭРИ.
11. Сформулируйте цели проведения проектного анализа худшего случая.
12. Сформулируйте цели проведения проектного анализа нештатных ситуаций.
13. Дайте характеристику основного содержания и методов выполнения работ по контролю правильности применения ЭРИ в РЭС.
14. Дайте характеристику формы «Перечня ЭРИ, разрешенных для применения в аппаратуре КА с длительными САФ».
15. Дайте характеристику назначения и формы карт рабочих режимов комплектов ЭРИ.
16. Дайте характеристику процесса проектирования РЭС с применением САПР.

Глава 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА ЭТАПАХ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЭС

5.1. Наземная экспериментальная отработка

5.1.1. Общие сведения

В процессе создания КА их составные части, в том числе оборудование и РЭС, до запуска проходят следующие этапы экспериментальных исследований [25]:

- экспериментальную отработку;
- предварительные испытания;
- приемочные испытания.

Цель наземной экспериментальной отработки (НЭО) – достоверно оценить соответствие создаваемого объекта заданным требованиям, выявить и устранить схемно-конструктивные недостатки разработки, способные повлиять на функциональные и эксплуатационные характеристики объекта.

Устанавливаемая действующей в космической отрасли общая схема наземной экспериментальной отработки бортового оборудования КА приведена на рис. 5.1.

Объем автономной отработки оборудования включает в общем случае:

- лабораторные отработочные испытания (ЛОИ), которые относятся к исследовательским испытаниям;
- конструкторско-доводочные испытания (КДИ), которые относятся к отработочным испытаниям;
- специальные испытания (СПИ).

ЛОИ оборудования – это испытания, осуществляющие первичную автономную отработку оборудования и предназначенные для выдачи разрешения на изготовление необходимого количества экземпляров оборудования данного наименования для завершения автономной отработки.

Основной целью ЛОИ является проверка правильности принятых схемно-конструктивных решений построения оборудования с точки зрения достижения требуемых функциональных и эксплуатационных характеристик.

Для проведения ЛОИ используется отработочный комплект оборудования, для которого не требуется иметь идентичную лётному комплекту конструкцию, не обязательным является также соответствие последнему по применяемым комплектующим ЭРИ, процессам изготовления и контроля.

Целями КДИ является проверка соответствия создаваемого объекта требованиям ТЗ (включая требования по ресурсу), а также проверка работоспособности

в предельных эксплуатационных режимах работы (т.е. оценка запасов по работоспособности).

Испытания проводят на первых образцах, изготовленных в полном соответствии с рабочей КД и выдержавших испытания в объеме предъявительских и приемосдаточных.

По результатам КДИ проводят необходимую корректировку КД на оборудование и дают разрешение на изготовление штатного (лётного) комплекта.

Специальные испытания (СПИ) подтверждают отдельные специфические требования к оборудованию (устойчивость к ионизирующему излучению, стойкости к электромагнитному импульсу, разрядам статического электричества и др.). СПИ проводят, как правило, на образцах-представителях оборудования конкретного типа.

В общем случае комплекс автономных отработочных испытаний (КОИ) включает в себя ЛОИ, КДИ и СПИ, а также граничные (ГИ) и ресурсные испытания (РИ). Целью ГИ является определение предельных возможностей объекта, а РИ – определение (подтверждение) ресурса.

Для контроля качества изготовления оборудования оно подвергается предъявительским (ПрИ) и приемосдаточным испытаниям (ПСИ), а при наличии определенной серийности или при планируемом изготовлении образцов данного оборудования в течение продолжительного времени – периодическим испытаниям (ПИ). Последние служат для подтверждения стабильности процесса производства.

При необходимости экспериментальной оценки эффективности и целесообразности схемно-конструктивных изменений или изменений технологического процесса изготовления оборудования, для которого автономная наземная экспериментальная отработка была выполнена ранее, проводят типовые испытания (ТИ).

После проведения входного контроля (ВК), выполняемого предприятием-потребителем оборудования, оно проходит этап комплексных испытаний (КИ) в составе бортовой системы и далее межведомственные (МВИ) и лётные испытания (ЛИ) в составе КА.

Оборудование, прошедшее всю описанную последовательность испытаний и подтвердившее испытаниями и необходимыми анализами соответствие требованиям ТЗ, считается квалифицированным для данного проекта.

В соответствии с отечественными правилами работа по наземной экспериментальной отработке оборудования, систем и КА организуется на основе комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО), оформляемой на этапах эскизного проектирования и выпуска рабочей документации.

В соответствии с указанным документом начальным этапом работ по планированию экспериментальной отработки является анализ априорной информации о создаваемом (применяемом) объекте оборудования с точки зрения степени его отработанности и априорного соответствия требованиям, предъявляемым моделью эксплуатации в конкретном объекте КА.

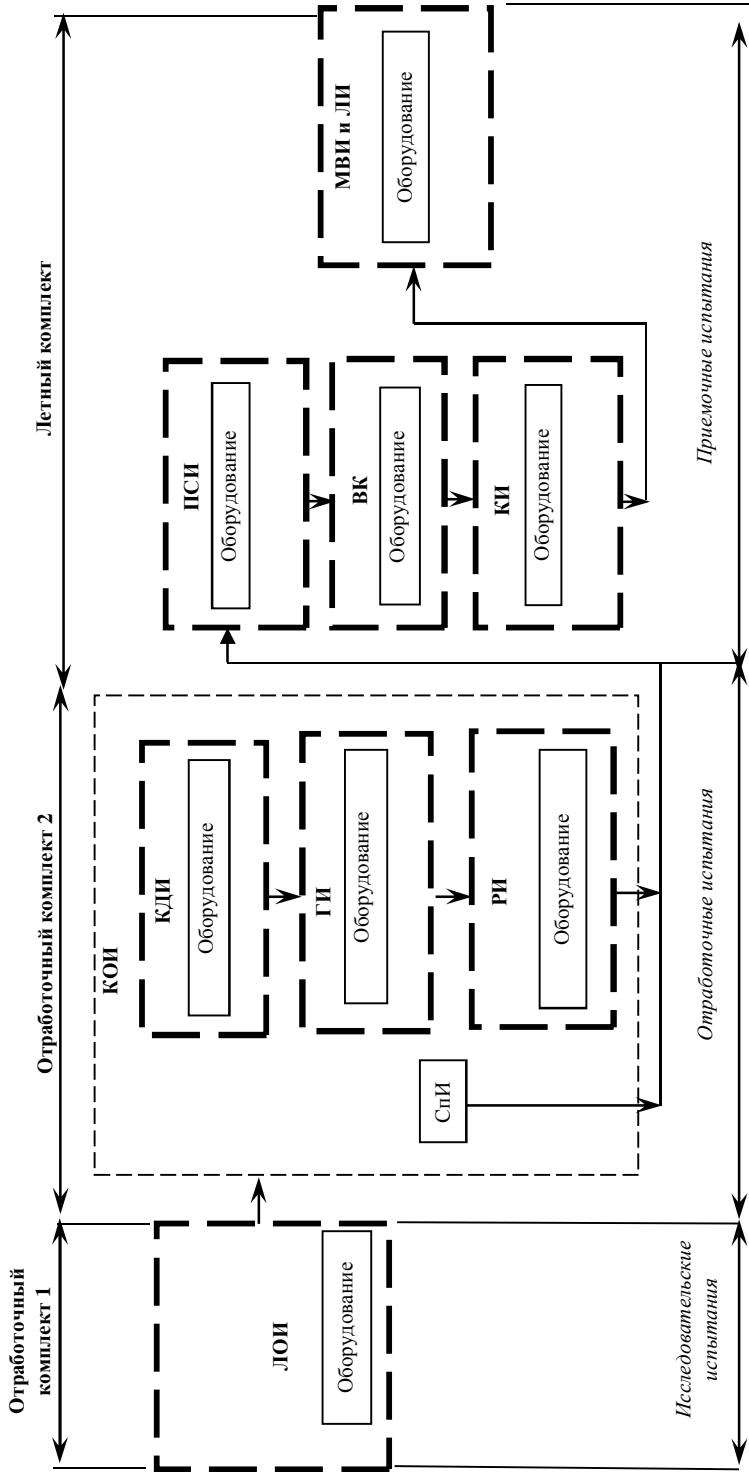


Рис. 5.1. Схема экспериментальной отработки и испытаний бортового оборудования КА

При этом квалификация определяется как процесс подтверждения (на основе представления объективных свидетельств) соответствия характеристик объекта установленным требованиям, выполняемый последовательно на этапах его разработки, изготовления, испытаний, приемки и эксплуатации.

Квалификация бортового оборудования, являющаяся составной частью работ по квалификации систем и КА в целом, организуется и выполняется нарастающим итогом по стадиям жизненного цикла и по уровням разукрупнения оборудования, начиная с комплектующих ЭРИ и материалов.

Квалификация может осуществляться методами расчета, анализа и оценки аналогов, а также методами испытаний, обеспечивающих подтверждение соответствия изделий заданным техническим требованиям и модели эксплуатации.

По степени автономной отработки все оборудование, планируемое к применению на конкретном объекте КА, в соответствии с отечественными НД разделяют на следующие категории [63]:

– А – оборудование, разрабатываемое специально для данного изделия, которое должно проходить отработочные (а при необходимости и исследовательские) испытания в полном объеме;

– Б – оборудование, ранее разработанное и прошедшее ЛОИ и КДИ для данного или другого изделия с условиями эксплуатации, аналогичными данному, но планируемое к эксплуатации с некоторыми схемно-конструктивными изменениями (в том числе в части выбора ЭРИ, деталей и материалов) или с изменениями технологического процесса изготовления; аппаратура этой категории в зависимости от характера и объема изменений может быть допущена (по согласованию с представителем заказчика) к эксплуатации в составе изделия на основе выполненных расчетов, анализов без проведения или с проведением ТИ, подтверждающих эффективность и целесообразность предлагаемых изменений;

– В – оборудование, ранее разработанное и прошедшее ЛОИ и КДИ для другого изделия, заимствуемое на данное изделие без изменений, указанных для категории Б, но с предъявлением более жестких требований к условиям эксплуатации, рабочим характеристикам и (или) надежности; оборудование этой категории может быть допущено к эксплуатации в составе данного изделия только после проведения дополнительных КДИ или СПИ в условиях, не менее жестких, чем требования данного изделия;

– Г – оборудование, ранее разработанное и прошедшее ЛОИ и КДИ для другого изделия, заимствуемое на данное изделие без изменений, указанных для категории Б, и удовлетворяющее требованиям данного изделия по условиям эксплуатации, рабочим характеристикам и (или) надежности, указанным для категории В. Оборудование этой категории допускается к эксплуатации в составе данного изделия без дополнительных испытаний.

Методические рекомендации по установлению категории квалификации приведены в данном пособии (см. ч. 2).

Установление квалификационного статуса оборудования – задача, в решении которой участвуют его поставщики и потребители (заказчики), а результаты

отражаются в КПЭО на составные части КА более высокого уровня разукрупнения.

Устанавливаемые в КПЭО общие требования и нормы испытаний бортового оборудования структурированы применительно к этапам его создания и направлены на достижение следующих целей:

На этапе проектирования

– проверка эффективности принимаемых структурно-функциональных и схемно-конструктивных решений в части обеспечения функциональных и основных эксплуатационных характеристик (выполняется с использованием лабораторных макетов и (или) на отработочных комплектах в процессе лабораторных отработочных испытаний);

На этапе разработки рабочей документации

– проверка эффективности принятых конструктивно-технологических решений в части обеспечения работоспособности оборудования в предельных режимах и условиях эксплуатации, наличия запасов работоспособности и требуемого ресурса (выполняется на отработочных комплектах оборудования при конструкторско-доводочных испытаниях и специальных испытаниях);

На этапе приемки штатного оборудования

– проверка качества изготовления каждого образца оборудования в части выявления скрытых производственных дефектов, влияющих на функциональные и эксплуатационные характеристики (выполняется при предъявительских и приемосдаточных испытаниях штатных образцов оборудования).

Испытания проводят по следующим документам:

– автономные отработочные (ЛОИ, КДИ, Спи) – по отдельным программно-методикам (ПМ);

– ПИ, ПрИ и ПСИ – по ТУ на оборудование.

Экземпляры бортового оборудования КА, подвергавшиеся ЛОИ, КДИ, Спи, ПИ и ТИ, к лётной эксплуатации или к лётным (натурным) испытаниям в составе КА не допускаются.

Экземпляры, подвергавшиеся КДИ, сохраняют после испытаний в течение гарантийных сроков, установленных в ТУ на оборудование. По истечении гарантийного срока должно быть принято решение о продолжении хранения, об утилизации или возможном использовании этих экземпляров оборудования.

Характеристика методических рекомендаций по объему и методам ЛОИ, КДИ и ПСИ бортового оборудования КА дана с помощью табл. 5.1–5.3.

Для объяснения места автономных испытаний оборудования в системе наземной экспериментальной отработки КА на рис. 5.2 показана общая последовательность наземной отработки КА, которая включает в себя следующие виды испытаний:

- входной контроль оборудования;
- интеграционные испытания подсистем платформы (бортового комплекса управления – БКУ, системы ориентации и стабилизации – СОС);
- ПСИ бортовых ретрансляционных комплексов (БРК-1 и БРК-2);
- стыковка платформы с секцией полезной нагрузки (Пн);
- электрические испытания КА перед испытаниями на воздействие внешних факторов;
- испытания на механические и термовакуумные воздействия;
- электрические испытания КА после испытаний на воздействие внешних факторов;
- итоговые электрические испытания КА, включая высокочастотные испытания (ВЧИ);
- заключительные операции и проверки (включая проверку герметичности и заправку системы терморегулирования – СТР, установку крыльев батареи солнечной – БС).

Таблица 5.1

**Испытания лабораторного макета и (или) лабораторные отработочные испытания
(отработочный комплект оборудования)**

№ п/п	Наименование испытаний и проверок	Требования к методам испытаний (нормы на воздействующие факторы)
1. Подтверждение и проверка функциональных характеристик		
1.1	Проверка электрической схемы	Проверка: – исходного состояния (по таблицам соединений, перечням точек контроля и др.); – целостности цепей (при двух полярностях подключения); – разобщенности электрических цепей
1.2	Проверка работоспособности	Объем, методы и перечень проверяемых параметров – по ПМ главного конструктора. Проверка проводится при крайних значениях питающего напряжения
2. Подтверждение соответствия условиям эксплуатации		
2.1	Испытания на холодоустойчивость	Испытательное значение температуры – ниже предельно допустимой пониженной температуры при эксплуатации на 10°С (оборудование включено при контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)
2.2	Испытания на теплоустойчивость	Испытательное значение температуры – выше предельно допустимой повышенной температуры при эксплуатации на 10°С (тепловыделяющее оборудование включено при наборе температуры и контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)
2.3	Испытания на устойчивость при воздействии пониженного давления, совмещаемые с испытаниями на термоустойчивость	Давление – не более 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст., температура – по п. 2.2, проверка работоспособности – при максимальном напряжении питания, на тепловыделяющих узлах и ЭРИ – термодатчики, время выдержки – не менее 72 ч
2.4	Проверка термоэлектрических режимов ЭРИ	Предварительный анализ (проверяется соответствие номенклатуры примененных ЭРИ действующим ограничительным перечням, наличие ограничений по коэффициентам нагрузки и температуре корпуса ЭРИ)

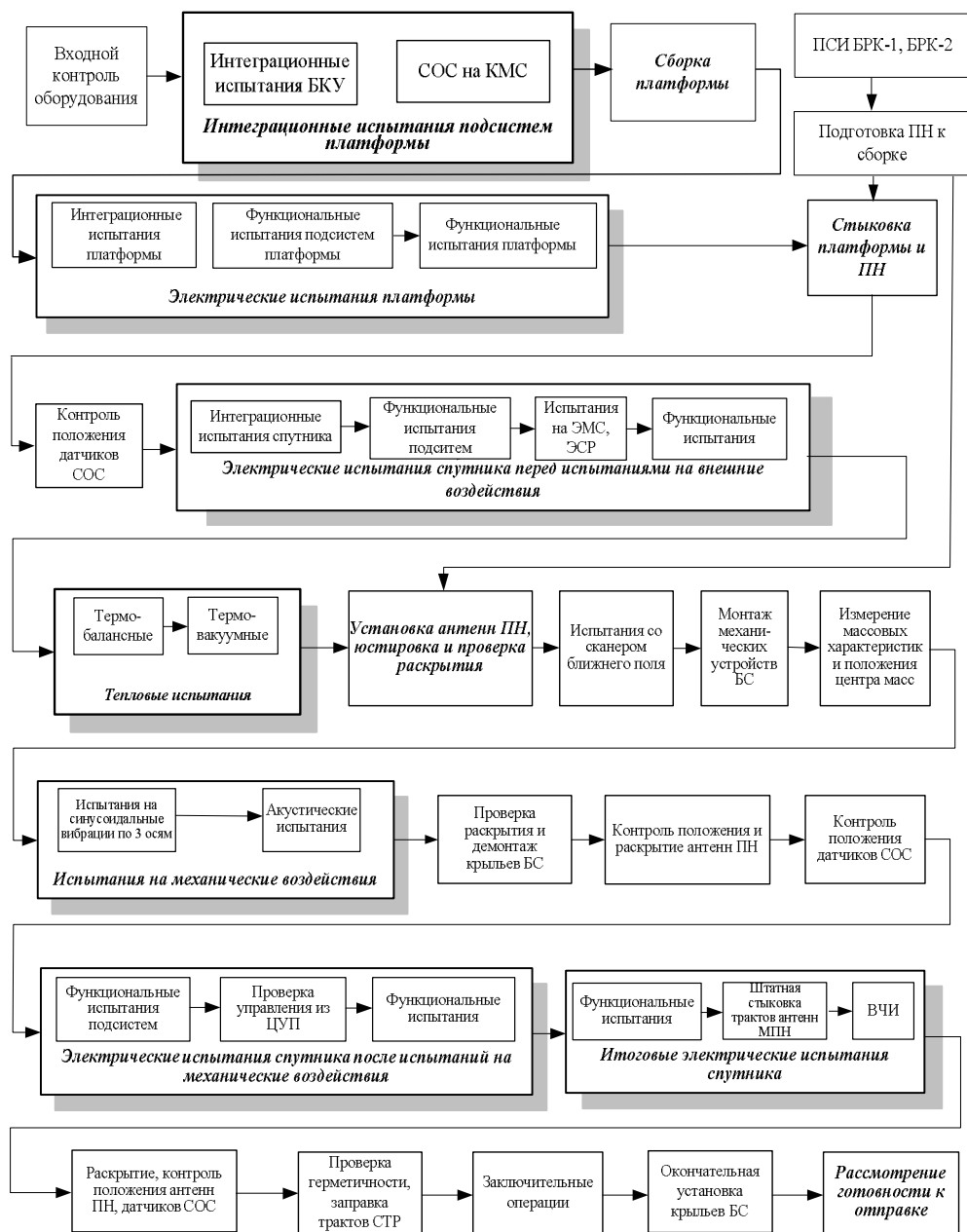


Рис. 5.2. Последовательность наземной отработки КА

**Конструкторско-доводочные и специальные испытания
(отработочный комплект оборудования, изготовленный и принятый по КД)**

№ п/п	Наименование испытаний и проверок	Требования к методам испытаний (нормы на воздействующие факторы)
1. Подтверждение и проверка функциональных характеристик		
1.1	Проверка электрической схемы	Проверка: – исходного состояния (по таблицам соединений, перечням точек контроля); – целостности цепей (при двух полярностях подключения); – разобщенности электрических цепей
1.2	Проверка электрического сопротивления и электрической прочности изоляции	Испытательное напряжение – в зависимости от максимального рабочего напряжения (по ГОСТ РВ 20.57.310)
1.3	Проверка работоспособности	Объем, методы и перечень проверяемых параметров – по ПМ главного конструктора. Проверка проводится при крайних значениях питающего напряжения и уровней внешних воздействующих факторов
2. Подтверждение и проверка соответствия условиям эксплуатации		
2.1	Испытания на прочность при транспортировании (в штатной упаковке)	Форсированные испытания: общее количество ударов – не менее 6 000, длительность – 5–10 мс, пиковое ударное ускорение – 9 g, частота – до 120 ударов/мин
2.2	Испытания на виброустойчивость и (или) вибропрочность	Должны быть определены значения критических и резонансных частот (по ГОСТ РВ.20.57.305–98). Для оборудования с большим (>4) числом резонансных частот применять стационарную вибрацию в диапазоне 20–2 000 Гц (метод «случайной вибрации» или «октавный»), для оборудования с малым (<4) числом резонансных частот допускается проводить испытания на фиксированных частотах. Уровни воздействий (по ускорению и продолжительности действия) – с учетом коэффициентов квалификации (соответственно не менее 2,0 и 2,0 – для случайной вибрации и не менее 1,4 и 2,0 – для октавной вибрации)
2.3	Испытания на устойчивость и (или) прочность при ударно-импульсных нагружениях	Диапазон значений по уровню и количеству (продолжительности) воздействия в соответствии с эксплуатационными требованиями при коэффициенте квалификации не ниже 1,4
2.4	Испытания на устойчивость при воздействии линейных (центробежных) ускорений	Диапазон значений ускорения и времени воздействия с учетом эксплуатационных значений при коэффициенте квалификации не ниже 1,4 (испытания проводят при величинах ускорений более 10 g)
2.5	Испытания на холодоустойчивость	Испытательное значение температуры ниже предельно допустимой пониженной температуры при эксплуатации на 10°С (оборудование включено при контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)
2.6	Испытания на теплоустойчивость	Испытательное значение температуры выше предельно допустимой повышенной температуры при эксплуатации на 10°С (тепловыделяющее оборудование включено при наборе температуры и контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)

№ п/п	Наименование испытаний и проверок	Требования к методам испытаний (нормы на воздействующие факторы)
2.7	Испытания на стойкость при циклических изменениях температуры	Количество термоциклов – не менее 20, температура – по п. 2.5 и 2.6, время выдержки – в зависимости от массы оборудования
2.8	Испытания на теплоустойчивость в условиях, имитирующих невесомость	Давление в камере – 10–30 мм рт. ст., температура – по п. 2.6, электрическая нагрузка – максимально допустимая, расположение термодатчиков – по ПМ
2.9	Испытания на влагуустойчивость (влагу-стойкость)	Температура – 20–25°С, влажность – 95±3%, воздействие – более 96 ч
2.10	Испытания на устойчивость при воздействии избыточного давления внутри герметизированного оборудования	Испытательное давление – 1 500 мм рт. ст., выдержка – не менее 5 мин, контроль работоспособности, геометрических размеров и герметичности (по ОСТ 92-1527), число циклов – по ПМ
2.11	Испытания на устойчивость при воздействии пониженного давления (с термоциклированием)	Давление в камере – не более 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст., проверка работоспособности – при максимальном напряжении питания, на тепловыделяющих узлах и ЭРИ – термодатчики. В герметичной аппаратуре – контроль температуры на узлах и ЭРИ в условиях потери герметичности. Число термоциклов в вакууме – не менее 12, температура по п. 2.5 и 2.6
2.12	Проверка герметичности	По ОСТ 92-4316
2.13	Испытания на устойчивость при воздействии быстрого изменения давления	Начальное давление 850 мм рт. ст., скорость снижения давления – 80–100 мм рт. ст./с, циклический или непрерывный контроль работоспособности
2.14	Испытания на устойчивость или прочность при воздействии акустического шума	Уровни и продолжительность воздействия с коэффициентами квалификации +3 дБ и 2,0 соответственно
2.15	Испытания по определению запасов работоспособности по напряжению питания	Запас по изменению напряжения питания → 5–10% от крайних значений питающего напряжения
2.16	Испытания по обнаружению резонансов конструкции	Совмещаются с испытаниями на вибропрочность (виброустойчивость)
2.17	Испытания на воздействие ЭМП, ЭСР и ЭМС	Определяются методикой испытаний. Допускается проводить в составе систем и КА
2.18	Испытания на радиационную стойкость	Определяются методикой испытаний в соответствии с ОСТ 134-1034
3. Подтверждение ресурса		
3.1	Проверка термоэлектрических режимов ЭРИ	Непосредственные замеры температуры на греющихся ЭРИ при максимальной нагрузке и крайнем значении температуры основания приборов по методикам РДВ 319.01.09–94 (ред. 2-2000)
3.2	Испытания на технический ресурс (РИ)	Наработка – не менее 100% требуемого ресурса или форсированные (по ГОСТ РВ 50698) испытания (наработка – более 5 000 ч, число термоциклов – 70)

**Приемосдаточные испытания (включая предъявительские испытания)
(лётный комплект оборудования)**

№ п/п	Наименование испытаний и проверок	Требования к методам испытаний (нормы на воздействующие факторы)
1. Подтверждение функциональных характеристик		
1.1	Проверка электрической схемы	Проверка: – исходного состояния (по таблицам соединений, перечням точек контроля); – целостности цепей (при двух полярностях подключения); – разобщенности электрических цепей
1.2	Проверка электрического сопротивления и электрической прочности изоляции	Испытательное напряжение – в зависимости от максимального рабочего напряжения (по ГОСТ РВ 20.57.310)
1.3	Проверка работоспособности	Объем, методы и перечень проверяемых параметров – по ПМ главного конструктора. Проверка проводится при крайних значениях питающего напряжения и уровней внешних воздействующих факторов
2. Подтверждение соответствия условиям эксплуатации		
2.1	Испытания на вибропрочность	Для оборудования с большим (>4) числом резонансных частот применять стационарную вибрацию в диапазоне 20–2 000 Гц (методы «случайной вибрации» или «октавный»), для оборудования с малым (<4) числом резонансных частот допускается проводить испытания на фиксированных частотах. Уровни воздействий – в соответствии с эксплуатационными требованиями
2.2	Испытания на холодоустойчивость	Испытательное значение температуры ниже предельно допустимой пониженной температуры при эксплуатации на 5°С (аппаратура включена при контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)
2.3	Испытания на теплоустойчивость	Испытательное значение температуры выше предельно допустимой повышенной температуры при эксплуатации на 5°С (тепловыделяющая аппаратура включена при наборе температуры и контроле работоспособности после выдержки на температурной «полке»)
2.4	Испытания на стойкость при циклических изменениях температуры	Количество термоциклов – не менее 7, температура – по п. 2.2 и 2.3, время выдержки – в зависимости от массы оборудования
2.5	Испытания на устойчивость при воздействии пониженного давления (с термоциклированием)	Давление в камере – не более 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст., число термоциклов не менее 5 с учетом: объема проверок ячеек и узлов; схемно-конструктивных особенностей оборудования; данных о характерных дефектах и др., температура – по п. 2.2 и 2.3
2.6	Проверка герметичности (для герметичного оборудования)	По ОСТ 92-4316

№ п/п	Наименование испытаний и проверок	Требования к методам испытаний (нормы на воздействующие факторы)
3. Подтверждение ресурса		
3.1	Проверка термоэлектрических режимов ЭРИ	Проверка полноты КРР и соответствия их содержания введенным ограничениям по электрическим и температурным нагрузкам (по РДВ 319.01.09–94, ред. 2-2000)
3.2	Технологический прогон	Не менее 400 ч (40% – при нормальных климатических условиях и номинальном $U_{шт}$; 50% – при максимальных температуре и $U_{шт}$; 10% – при минимальных температуре и $U_{шт}$)

5.1.2. Особенности зарубежной системы наземной экспериментальной отработки

Общепринятая в настоящее время за рубежом концепция квалификации изделий космической техники длительного функционирования, направленная на сокращение затрат и сроков их создания, получила название «протолётной».

Основными положениями «протолётной» концепции квалификации и приемки являются:

- наиболее жесткие режимы квалификации и приемки применяются на уровне «оборудование»;
- ресурсные испытания проводятся только на уровне «оборудование»;
- квалификационные и приемочные испытания на уровне «подсистема» и уровне «система» проводятся на первом образце, который в дальнейшем используется для лётной эксплуатации;
- приемка уровней «подсистема» и «система», как правило, проводится в составе КА.

Требования к порядку и условиям квалификации и приемки задаются от верхнего уровня к нижнему, а подтверждаются – от нижнего уровня к верхнему.

Для квалификации на уровне оборудования проводятся испытания, при которых оборудование подвергается всем возможным эксплуатационным режимам и предельным внешним воздействиям в наиболее неблагоприятном сочетании (например, предельная температура в сочетании с предельным напряжением) с целью демонстрации того, что и по уровням, и по продолжительности воздействий имеется запас. Поскольку квалификационные испытания при предельных внешних воздействиях являются разрушающими, для них создается специальная квалификационная модель оборудования (инженерная квалификационная модель – EQM или квалификационная модель – QM).

Объем испытаний для квалификации оборудования зависит от степени новизны оборудования и в общем случае для вновь разрабатываемого оборудования может включать в себя:

- разработочные испытания;
- квалификационные испытания;

- ресурсные испытания;
- протолётные испытания (для первого лётного образца) или приемочные испытания (для последующих лётных образцов).

При испытаниях на уровне «подсистема» не используются предельные и разрушающие нагрузки, т.е. применяются необходимые меры для обеспечения того, чтобы после испытаний оборудование, входящее в состав подсистемы, сохранило работоспособность. Поэтому квалификация подсистемы достигается посредством функциональных испытаний и испытаний на внешние воздействия с уменьшенными уровнями и/или продолжительностью по отношению к квалификационным испытаниям оборудования.

Если технически невозможно представить подсистему как самостоятельную конструктивную единицу, то испытания на внешние воздействия совмещают с квалификационными испытаниями на уровне системы.

При испытаниях на уровне «система» также не используют предельные и разрушающие нагрузки, поэтому квалификация системы достигается посредством функциональных испытаний и испытаний на внешние воздействия с уменьшенными уровнями и/или продолжительностью по отношению к квалификационным испытаниям оборудования.

Если технически невозможно представить систему как самостоятельную конструктивную единицу, то испытания на внешние воздействия совмещают с квалификационными испытаниями на уровне системы более высокого ранга (например, бортовой ретрансляционный комплекс как система проходит квалификацию в составе космического аппарата).

Типовая последовательность испытаний бортового оборудования представлена в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Типовая последовательность испытаний бортового оборудования

Вид испытаний	Модель		
	EQM/QM	PFM	FM
Испытания на функционирование	X	X	X
Поиск резонанса при синусоидальных воздействиях (0–2 кГц)	X	X	X
Синусоидальная вибрация	X	X	–
Случайная вибрация / акустический шум	X	X	X
Поиск резонанса при синусоидальных воздействиях (0–2 кГц)	X	X	X
Удары	X	–	–
Поиск резонанса при синусоидальных воздействиях (0–2 кГц)	X	X	–
Испытания на функционирование	X	X	X
Термовакuumные испытания	X	X	X
Испытания на функционирование	X	X	X
Испытания на воздействие электрического поля (ЭМС, ЭСР)	X	X	–
Испытания на функционирование	X	X	X

Примечание. PFM – протолётная модель, FM – лётная модель.

При квалификационных испытаниях, как правило, устанавливаются следующие требования к методикам испытаний:

- испытательная температура должна превышать рабочую на $\pm 10^{\circ}\text{C}$;
- в процессе термовакуумных испытаний должно быть проведено не менее 3 испытаний на «холодный старт» (включение при минимальной температуре и минимальном напряжении питания);
- в процессе изготовления должно быть проведено электротермоциклирование при крайних значениях температур с количеством циклов не менее 10;
- уровни ускорений при испытаниях на синусоидальную вибрацию должны быть в 1,5 раза выше, чем приемочные уровни;
- для случайных вибраций режимы нагружения должны быть жестче, чем при приемочных испытаниях (в 1,5 раза по общему ускорению, в 2,25 раза по спектральной плотности мощности ускорения);
- длительности квалификационных испытаний на случайную вибрацию должны быть в 2 раза больше, чем на приемочных испытаниях.

В обобщенном виде результаты сопоставления методических подходов к разработке и НЭО бортового оборудования КА с длительными САФ, устанавливаемых отечественными и зарубежными (европейскими) НД, показаны в табл. 5.5.

Сравнительный анализ норм и требований, приведенных в табл. 5.5, показывает аналогичность ключевых положений отечественных и зарубежных НД. В то же время в части организации работ, полноты описания системы обеспечения и подтверждения технических требований, а также в части предоставления реальной возможности контроля качества выполнения работ заказчиком требования зарубежных НД существенно более проработаны и конкретны. Методы основных видов испытаний оборудования, используемые при экспериментальной отработке зарубежного оборудования, в ряде случаев существенно более жесткие, чем аналогичные испытания, проводимые по действующим отечественным НД.

Таблица 5.5
Сравнительный анализ норм и требований отечественных и зарубежных НД

Этапы	Требования отечественных НД [7, 8]	Требования зарубежных НД [70–75]
Подготовка контракта (договора)	Техническое задание (ТЗ)	Технические приложения к Контракту: – содержание работ; – спецификация (технические требования); – требования к электрическим интерфейсам и внешним воздействиям; – требования по разработке, квалификации и приемке; – программа гарантирования качества; – программа гарантирования надежности; – программа проектирования и разработки

Продолжение табл. 5.5

Этапы	Требования отечественных НД [7, 8]	Требования зарубежных НД [70–75]
Проектирование, разработка	ПОН	– Требования по разработке, квалификации и приемке; – программа гарантирования качества; – программа гарантирования надежности
	КПЭО	Test-plan Программа проектирования и разработки (контрактный документ)
	Проектные расчеты и анализы: – прочности; – тепловые; – надежности; – стойкости; – видов, последствий и критичности отказов (АВПКО); – перечень критичных элементов; – нештатных ситуаций	Проектные расчеты и анализы: – прочности; – тепловые; – надежности; – ресурса и сохраняемости; – стойкости; – видов, последствий и критичности отказов; – перечень и программа контроля критичных элементов; – анализ аварийных ситуаций; – функциональный анализ; – анализ нагрузок комплектующих; – анализ перерывов; – анализ надежности персонала
	Перечень разрешенных ЭРИ	Перечень разрешенных ЭРИ
	Перечень разрешенных материалов	Перечень разрешенных материалов Перечень разрешенных процессов
	Технические условия	Спецификация
	Дополнительные требования к ЭРИ: – наличие сертификатов соответствия на ЭРИ иностранного производства	Дополнительные требования к ЭРИ: – обязательные отбраковочные испытания; – наличие документов квалификации на каждую партию; – выборочный разрушающий контроль ЭРИ от каждой партии
НЭО	Отработочные испытания: – лабораторные отработочные (ЛОИ); – конструкторско-доводочные (КДИ);	Разработочные испытания Квалификационные испытания EQM; QM
	– граничные (ГИ); – ресурсные (РИ); – типовые (ТИ)	
	Приемочные испытания: – предъявительские (ПРИ); – приемосдаточные (ПСИ); – периодические (ПИ)	Протоletные приемочные испытания. Приемочные испытания
	Требования к методам испытаний	
Термоциклирование	3 цикла (в выключенном состоянии)	Не менее 10 термоциклов (во включенном состоянии)

Этапы	Требования отечественных НД [7, 8]	Требования зарубежных НД [70–75]
Контроль после механических испытаний	Внешний осмотр	Снятие и сверка резонансных характеристик до и после испытаний
Запасы механической прочности	Проверяются при отработке	Квалификация производится на отработочных образцах с превышением уровня и продолжительности механических воздействий (по отношению к эксплуатационным значениям) в 1,5–2,25 раза
Запасы по рабочей температуре	Проверяются при отработке	Проверяются при приемке: – для 1-го лётного образца с превышением крайних значений на $\pm 10^{\circ}\text{C}$; – для последующих лётных образцов – на $\pm 5^{\circ}\text{C}$

Методология управления надежностью, изложенная во второй части книги, учитывает результаты изложенного выше анализа.

5.2. Технологическая тренировка РЭС и их составных частей

Технологическая тренировка (ТТ) РЭС и их составных частей, выполняемая на этапе изготовления аппаратуры, как правило, включает в себя последовательное проведение отбраковочных испытаний и технологического прогона [46].

Организация ТТ предполагает выбор состава и уровней внешних факторов, которым должны подвергаться испытываемые образцы, режимов их работы, а также определение продолжительности тренировки. Для этого используют априорную информацию о качестве элементов конструкции аппаратуры и комплектующих ЭРИ, о характерных дефектах этих элементов и изделий, о модели эксплуатации аппаратуры, о состоянии технологического процесса изготовления данной аппаратуры и ее составных частей. Процедура ТТ включает определение (прогноз) ожидаемого числа дефектов в испытываемом объекте, а также последовательное уточнение (по результатам ТТ) видов и режимов испытаний. Последнее осуществляется на основе анализа причин и механизмов происшедших при ТТ отказов аппаратуры и использования всех источников информации об отказах и неисправностях, которые могут быть получены при испытаниях и эксплуатации аналогичных РЭС.

Состав, последовательность, условия и продолжительность воздействия внешних факторов на объект тренировки выбираются индивидуально для каждого типа аппаратуры на этапе разработки и изготовления и испытаний опытного образца, исходя из наиболее жёстких условий эксплуатации аппаратуры, механизмов отказов, присущих разработанной аппаратуре и применённой в ней элементной базе, статистических данных по отказам на всех видах испытаний аналогичной аппаратуры и её составных частей.

При выбранных видах воздействий и режимах испытаний проводится технологическая тренировка в течение установленной продолжительности и фиксируется количество выявленных при ТТ дефектов. Если количество выявленных дефектов соответствует ожидаемому, то технологическая тренировка завершается. Если равенства нет, то уточняются состав воздействий и режимы испытаний.

Испытания при уточнённом составе воздействий и режимах проводятся до тех пор, пока оставшееся число дефектов не станет равным нулю.

При проведении ТТ обращают внимание на то, чтобы каждый вид воздействия «провоцировал» конкретные механизмы отказов, присущих испытываемой аппаратуре, ее составным частям и комплектующим ЭРИ, а диагностический контроль позволял выявлять эти механизмы на ранних этапах их проявления.

5.2.1. Оценка числа дефектов аппаратуры и её составных частей

Прогнозирование ожидаемого числа дефектов ($d_{ож}$) в аппаратуре проводится в следующей последовательности:

а) для микросборок:

– определяются типы и количество комплектующих ЭРИ, входящих в состав микросборок, в том числе конструктивно-технологических элементов (КТЭ) самой микросборки (печатной платы, напылённых резисторов и конденсаторов и т.п.);

– находится доля дефектных ЭРИ, в том числе КТЭ, по официальным справочным данным и (или) по опыту применения микросборок и (или) эксплуатации аппаратуры с учётом особенностей комплектующих ЭРИ, результатов оценки их качества в сферах выходного контроля у поставщика, входного контроля, производства микросборок и их испытаний, данных, приведённых в справочниках по надёжности изделий электронной техники, электротехники и квантовой электроники и в других источниках;

– определяется число дефектов в микросборке как сумма произведений количества ЭРИ и КТЭ каждого типа на соответствующую долю дефектных изделий;

б) для ячеек и печатных плат:

– определяется количество ЭРИ каждого типа, в том числе микросборок, на данном типе платы;

– устанавливается доля дефектных ЭРИ, входящих в состав данной платы, за исключением доли дефектных микросборок, определённых ранее с учётом коэффициентов эксплуатации в данной аппаратуре;

– определяется ожидаемое число дефектов каждого типа платы как сумма произведений количества ЭРИ каждого типа на соответствующую долю их дефектности, к которой прибавляется прогнозируемое число дефектных микросборок, установленных на плате;

в) для устройств и блоков:

– определение ожидаемого числа дефектов каждого устройства (блока) производится суммированием ожидаемого числа дефектов каждой платы, входящей в данное устройство (блок), и числа дефектов ЭРИ, входящих в состав данного устройства (блока) непосредственно;

з) для аппаратуры:

– суммарное ожидаемое число дефектов аппаратуры определяется как сумма ожидаемого числа дефектов для каждого устройства (блока), входящего в данную аппаратуру, и ожидаемого числа дефектов ЭРИ, входящих в аппаратуру непосредственно и учтённых в устройствах и блоках.

5.2.2. Выбор режимов технологической тренировки

Выбор внешних воздействующих факторов при технологических тренировках осуществляется исходя из эффективности выявления конкретных типов дефектов, возникающих при конструировании, производстве и применении аппаратуры и ЭРИ.

Решение данной задачи проводится с учетом следующих положений:

– необходимо проводить испытания таким образом, чтобы каждый вид воздействия инициировал конкретные механизмы отказов, присущие испытываемой аппаратуре, а диагностический контроль позволял выявлять несоответствия на ранних этапах их проявления. При этом выбранные виды воздействий не должны повреждать аппаратуру и вносить в неё дополнительные дефекты, не свойственные её конструкционному построению, технологическому исполнению и условиям применения;

– следует принимать меры по исключению превышения допустимых воздействий на ЭРИ, установленных в микросборках, узлах и блоках аппаратуры, из-за возможного выхода параметров испытательного оборудования за установленные допуски, отключения электропитания или систем охлаждения и несанкционированных или ошибочных действий операторов;

– при всех видах испытаний и работ с составными частями и аппаратурой в целом необходимо обеспечивать соблюдение температурно-влажностного режима, исключающего возможность конденсации влаги из окружающей среды или замкнутого объема прибора (составной части) на его внешних или внутренних поверхностях;

– должны быть приняты меры по проведению тщательного учета и углублённого анализа причин всех отказов, зарегистрированных в ходе проводимых испытаний.

Провоцирование отказов, обусловленных схемно-конструкционными и производственно-технологическими дефектами аппаратуры и ЭРИ, может производиться воздействием внешних факторов, которые не встречаются в эксплуатации, но вызывают возникновение аналогичных видов и механизмов отказов, т.е. не нарушают принципа автономности.

Перечень видов воздействий, рекомендуемых для применения при ТТ, приведен в табл. 5.6 [50].

Таблица 5.6

Виды воздействий при ТТ

Вид испытаний	Принятые сокращения	Уровень разукрупнения РЭА		
		Ячейка	Блок	Устройство
Ударное диагностирование (удары)	УД	+	+	–
Воздействие синусоидальной или широкополосной случайной вибрации	ВВ	+	+	–
Проверка работоспособности (в нормальных условиях, при изменении температуры и воздействии вибраций)	ПР	+	+	±
Воздействие низкой температуры	НТ	+	+	+
Воздействие высокой температуры	ВТ	+	+	+
Циклическое изменение температуры (термоциклирование)	ТЦ	+	+	±
Электротермотренировка в статическом (динамическом) режиме	ЭТТС (ЭТТД)	+	+	±
Воздействие повышенной влажности	ПВ	–	–	±
Воздействие пониженного давления	ПД	–	+	–
Включение-выключение аппаратуры	ВКЛ-ВЫКЛ	+	+	+

Перечень типичных дефектов, которые выявляются при воздействии различных внешних факторов, приведен в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Виды дефектов, выявляемых при ТТ

Виды дефектов, приводящих к отказам аппаратуры в эксплуатации	Виды воздействия, позволяющие выявить дефекты
1. Дефекты изготовления печатных плат	
Микротрещины, вздутия и расслоения проводящих и изолирующих слоёв плат	ПВ, УД, ВВ
Неравномерная толщина, ширина проводящего слоя, приводящая к локальным перегревам под нагрузкой	ВТ, ТЦ
Повышенная хрупкость осаждённого слоя проводника	УД, ВВ
Структурные нарушения внутренних слоёв, трещины слоёв, трещины в перемычках между слоями и в отверстиях	УД, ВВ
Остатки фоторезиста после вытравливания рисунка	ВТ, ТЦ
2. Дефекты сборки, монтажа плат, блоков	
Малый радиус изгиба выводов ЭРИ, проводников, кабелей, перегрузки при формовке выводов	УД, ВВ, ВТ
Неправильная установка ЭРИ, создающая повышенную статическую нагрузку или крутящий момент	УД, ВВ
Неправильная форма расположения крепления жгутов питания	УД, ВВ
Сильное натяжение проводов в трансформаторах, реле и других моточных изделиях	УД, ВВ

Продолжение табл. 5.7

Виды дефектов, приводящих к отказам аппаратуры в эксплуатации	Виды воздействия, позволяющие выявить дефекты
Перепутывание проводов в жгутах бифилярных кабелей	УД, ВВ
Неправильная по типу или номиналу установка ЭРИ (особенно резисторов по номиналу)	ПР, ВТ, НТ
Неправильное крепление элементов (неравномерная затяжка многорезьбовых соединений, отсутствие прокладок, неправильная установка заклёпок и др.), создающее повышенную локальную статическую нагрузку, повышенный крутящий момент, углубления в деталях от неправильно заточенного инструмента, снижающие их прочность	УД, ВВ
Неправильная, с перекосом, установка типовых элементов замены в гнездах и направляющих	УД, ВВ
Неправильное соединение кабелей	УД, ВВ
Некачественное стопорение, самооткручивание резьбовых соединений	УД, ВВ
Близкая к граничным значениям регулировка электро-механических устройств	УД, ВВ, ВТ, НТ
Слабые «дребезжащие» контакты реле, движков переменных резисторов, щёток электродвигателей	УД, ВВ
Слабый или неравномерный прижим мощных полупроводниковых приборов к радиатору, приводящий к увеличению теплового сопротивления и перегреву	ВТ, ТЦ
3. Дефекты пайки вследствие:	
плохого смешивания олова и свинца в припое	ТЦ, УД, ВВ
загрязнения припоя посторонними включениями, стружкой, опилками и т.д.	ТЦ, УД, ВВ
неправильного контроля температуры паяльника	ТЦ, УД, ВВ
несвоевременной смены припоя и флюса при пайке «волной»	ТЦ, УД, ВВ
плохой подготовки паяемых элементов и окисления выводов ЭРИ при неправильном или длительном хранении	ТЦ, УД, ВВ
механического относительного перемещения паяемых деталей в процессе охлаждения	ТЦ, УД, ВВ
слишком быстрого, неравномерного охлаждения паяемых деталей, неправильной геометрии припоя, создающей местные повышенные напряжения в месте пайки	ТЦ, УД, ВВ
увеличенного или уменьшенного зазора между паяемыми деталями по сравнению с оптимальным значением (0,3–0,4 мм)	ТЦ, УД, ВВ
4. Замыкания:	
припоем выводов микросхем или выводами микросхем на корпус	УД, ВВ, ТЦ
припоем проводящих дорожек	УД, ВВ, ТЦ
посторонними предметами (капли олова, обрезки монтажного провода, крепёжные детали) при их перемещении в закрытом пространстве под воздействием вибрации, ударов и т.д.	УД, ВВ

Виды дефектов, приводящих к отказам аппаратуры в эксплуатации	Виды воздействия, позволяющие выявить дефекты
проводника с повреждённой (из-за чрезмерного натяжения или оплавления) изоляцией на землю	УД, ВВ
проводников в разъёмах, соединителях на землю, между собой	УД, ВВ
5. Обрывы:	
проводников от разъёмов, реле, трансформаторов, монтажных колодок	УД, ВВ
проводников, повреждённых при подготовке к монтажу, сборке жгутов	УД, ВВ
проводников в жгутах из-за чрезмерного натяжения	УД, ВВ
токопроводящих дорожек печатных плат	УД, ВВ

5.2.3. Выбор методов технологической тренировки

При проведении ТТ аппаратуры и её составных частей стремятся комплексировать внешние воздействующие факторы, используя одновременно: синусоидальную или широкополосную случайную вибрацию (опыт использования этого метода показывает, что с его помощью выявляется до 20–30% дефектов); термоциклирование при повышенной и пониженной температурах (применение этого метода позволяет выявить до 35–40% всех дефектов); электротермотренировки при повышенной температуре и изменяющемся напряжении питания (этим методом выявляется до 25–30% всех дефектов); технологический (электрический) прогон при нормальном напряжении питания и нормальных условиях испытаний (позволяет выявить до 5–10% всех дефектов аппаратуры после отбраковочных испытаний).

Рекомендации по выбору методов технологической тренировки с учётом их эффективности приведены в табл. 5.8.

Термоциклирование является одним из наиболее эффективных видов ТТ, позволяющих выявить скрытые дефекты, обусловленные нарушениями режимов пайки, некачественным выполнением операций по изготовлению печатных плат, а также скрытые дефекты производства ЭРИ и нарушения технологического процесса их монтажа на печатные платы.

Вместе с тем следует иметь в виду, что имеются типы ЭРИ (например, мезосплавные диоды), которые в силу своих конструктивно-технологических особенностей не стойки к воздействию термоциклов, и техническими условиями на них такой вид внешнего воздействия не допускается. Поэтому при проведении термоциклирования составных частей аппаратуры с подобными элементами применяют специальные меры для их защиты.

В табл. 5.9 в качестве примера приведены рекомендуемые значения параметров термоциклирования аппаратуры наземной техники.

Электротермотренировка (ЭТТ) аппаратуры проводится с целью стабилизации параметров аппаратуры. При этом дополнительно выявляются необнару-

женные при термоциклировании скрытые дефекты микросхем и полупроводниковых приборов, связанные с нарушением контактов, загрязнением поверхности кристалла, а также дефекты, связанные с нарушениями применения ЭРИ в процессе монтажа в аппаратуру.

Т а б л и ц а 5.8

Методы ТТ

Уровни разукрупнения аппаратуры	Методы ТТ			
	Термоциклирование	Электротермотренировка	Случайная широкополосная вибрация	Синусоидальная вибрация
Платы	Эффективно	Средней эффективности	Средней эффективности	Неэффективна
Блоки	Эффективно	Средней эффективности	Эффективна	Средней эффективности
Аппаратура	Эффективно	Средней эффективности	Эффективна	Средней эффективности

Т а б л и ц а 5.9

Режимы термоциклирования

Параметры	Составные части аппаратуры		
	ячейка	блок	аппаратура
Максимальная температура $T_{\text{макс}}$, °С	70–125	70	по ТУ
Минимальная температура, °С	–60	–60	по ТУ
Скорость изменения температуры, °С/мин	10	5	1
Длительность выдерживания при $T_{\text{макс}}$, мин	30	180	480
Время включения питания, мин	5	20–30	100–180
Число термоциклов	10–20	10	3–10

Длительность ЭТТ рекомендуется выбирать не менее 120 ч. Наиболее часто время ЭТТ ячеек и блоков, содержащих микросхемы и полупроводниковые приборы, принимается равным 168 ч.

В процессе ЭТТ должна проводиться проверка функционирования, которая особенно важна для цифровых узлов, так как позволяет выявлять дефекты, приводящие к отказам типа «сбой» или «перемежающийся отказ».

При определении общего объема (продолжительности) технологической наработки составных частей аппаратуры в процессе производства и приемосдаточных испытаний (ПСИ) отечественные предприятия руководствуются рекомендациями, изложенными в табл. 5.10.

Т а б л и ц а 5.10

Продолжительность ТТ

Наименование составной части аппаратуры	Рекомендуемый объем наработки при производстве и ПСИ, ч	
	Технологическая тренировка	ПСИ
Микросборка	448	59
Плата, ячейка	374	60
Устройство (модуль), блок	387	109
Аппаратура	283	111

Контрольные вопросы

1. Назовите цели и задачи наземной экспериментальной отработки (НЭО) РЭС и КА.
2. Дайте характеристику цели проведения и типовой программе наземных лабораторных отработочных испытаний (ЛОИ) РЭС.
3. Опишите требования к образцам РЭС, подвергаемых ЛОИ.
4. Дайте характеристику цели проведения и типовой программе наземных конструкторско-доводочных испытаний (КДИ) РЭС.
5. Опишите требования к образцам РЭС, подвергаемых КДИ.
6. Опишите идеологию «протолётных» испытаний РЭС.
7. Дайте сравнительную характеристику принципов проведения НЭО в соответствии с отечественными НД и НД ЕКА.
8. Сформулируйте цели квалификации бортового оборудования и бортовых систем.
9. Дайте определения состояний квалификации бортового оборудования, соответствующих категориям А, Б, В или Г.
10. Поясните блок-схему процесса наземной экспериментальной отработки бортового оборудования.
11. Поясните блок-схему процесса наземной экспериментальной отработки КА.
12. Сформулируйте цели технологических тренировок изготавливаемых РЭС и их составных частей.
13. Опишите подходы к выбору режимов технологических тренировок РЭС и их составных частей.
14. Дайте характеристику эффективности методов технологической тренировки РЭС и их составных частей.

Глава 6. СИСТЕМНЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА ПРИЧИН ОТКАЗОВ

Успех в решении задачи обеспечения надежности технических объектов может быть достигнут на основе использования статистических и физических методов [50, 51].

Статистические методы, основанные на использовании аппарата теории вероятности и математической статистики, наиболее эффективны при статистическом регулировании технологических процессов изготовления РЭС и ЭРИ, оптимизации состава и объема испытаний, режимов и условий их эксплуатации, других факторов, которые по своей природе являются случайными и распространяются на представительную совокупность изделий. Вместе с тем вероятностно-статистический подход не дает достаточно полной информации о физических причинах пониженного качества и надежности РЭС и ЭРИ, требует проведения испытаний на значительных выборках в течение продолжительного времени, что затрудняет принятие оперативных и технически обоснованных мер по исключению отказов изделий, совершенствованию их конструкции и технологии производства. Кроме того, применение статистического подхода недостаточно эффективно в условиях мелкосерийного и многономенклатурного производства, что характерно как для радиоэлектронного бортового оборудования КА, так и для сложных и уникальных ЭРИ (прежде всего БИС и СБИС). Эти ограничения статистических методов по мере ускорения смены поколений могут быть компенсированы использованием физических методов, основанных на применении физико-химических и аналитических методов для исследования явлений, причин и физических механизмов, вызывающих возникновение отказов. На основании этих исследований разрабатываются корректирующие и предупреждающие действия по предотвращению отказов и устранению причин, их вызывающих. Применяемые в настоящее время методы и средства физико-технического анализа позволяют охватывать весь жизненный цикл РЭС и ЭРИ от этапов конструирования и разработки до этапа эксплуатации. Информация по физике отказов носит более детерминированный характер и относится, как правило, к конкретным изделиям [40, 42].

На современном этапе развития РЭС и ЭРИ физические аспекты качества и надежности приобретают первостепенное значение. Наиболее характерными чертами развития РЭС и ЭРИ являются рост сложности приборов и уменьшение геометрических размеров отдельных элементов. Так, степень интеграции интегральных микросхем достигает сотен тысяч и миллионов элементов на кристалле. Переход к субмикронным размерам элементов и внедрение субмикронной и нанотехнологий порождает и новые проблемы надежности. Усложнение приборов вызывает увеличение числа контролируемых параметров. В ряде случаев

исчерпывающие испытания с учетом всего многообразия сочетаний параметров просто невозможно провести. С ростом степени интеграции и миниатюризации приборов повышенные требования предъявляются к качеству материалов, точности, стабильности и настроенности технологических процессов, состоянию технологических сред. Точечные и объемные дефекты в материалах, дополняющиеся технологическими воздействиями в процессе производства, становятся соизмеримыми по размерам с активными элементами современных ЭРИ, прежде всего изделий микроэлектроники. Результаты исследования физических аспектов качества и надежности ЭРИ наиболее эффективны, если охватывают все стадии жизненного цикла изделий, преимущественно на возможно более ранних этапах разработки и производства.



Рис. 6.1. Использование информации по физике отказов

Широкое использование физических методов исследований для повышения качества и надежности в полной мере согласуется с принципами управления качеством, положенными в основу международных стандартов ИСО серии 9 000. Только на основе глубокого и системного исследования причин отказов можно принимать решения, основанные на фактах. Эффективные меры на основе достоверной информации о причинах и механизмах отказов могут обеспечить постоянное улучшение качества продукции предприятий.

Направления использования информации по физике отказов для обеспечения надежности РЭС и ЭРИ на различных стадиях жизненного цикла изделия приведены на рис. 6.1. В настоящем разделе рассматривается методология анализа причин отказов изделий, базирующаяся на сочетании физических и статистических методов исследования [48].

6.1. Принципы построения систем анализа отказов

Для установления причин отказов создаются системы анализа отказов (САО), в которых предусматриваются определенный порядок проведения анализа, его информационное, методическое и техническое обеспечение [49]. Поскольку анализ причин отказов может проводиться в различных условиях (на предприятиях, в специальных центрах, эксплуатирующих организациях), то основным требованием к САО является обеспечение оперативности, глубины анализа, достоверности и сопоставимости результатов. Для удовлетворения этого требования в системе должны быть регламентированы определенный порядок и методология проведения анализа.

Под порядком проведения анализа дефектных и отказавших изделий в широком смысле слова понимается весь комплекс организационно-технических мероприятий, которые начинаются с определения порядка передачи дефектных (отказавших) изделий на анализ и заканчиваются выдачей результатов анализа, обеспечивая оперативное установление видов, механизмов и причин появления отказов для последующей разработки рекомендаций, предложений и мероприятий по устранению выявленных причин возникновения и предотвращения отказов.

Информационное обеспечение анализа отказов – это комплекс сведений, сообщений и команд, направленных на поддержание функционирования системы анализа отказов с заданной оперативностью и достоверностью.

Для накопления априорной информации создаются классификаторы дефектов или причин отказов, являющиеся основой построения соответствующих информационных массивов (банков). Классификатор, как правило, является машинно-ориентированным документом, отражающим качественную диагностическую модель и позволяющим по мере накопления данных строить и более полные количественные модели. Для этого отрабатывается единая система обозначений видов, причин и механизмов отказов, пригодная для компьютерной обработки.

Результаты анализа накапливаются в соответствии с признаками, содержащимися в классификаторе, и группируются по типам ЭРИ и РЭА, схемным позициям, видам и причинам дефектов, механизмам разрушения, режимам применения, внешним воздействиям, средствам диагностики и использованном при исследовании методе анализа.

Структура информации о видах, причинах и механизмах отказов, содержащейся в создаваемых банках знаний, показана на рис. 6.2 [54].

Построение САО базируют на принципах иерархичности, рекуррентности, неповреждаемости, метрологической совместимости и производительности.

Согласно принципу иерархичности САО строится на основе элементарных ячеек, каждая из которых соответствует определенному уровню разукрупнения подвергаемого анализу объекта (РЭС, блок, узел, ЭРИ, материал). Согласно принципу рекуррентности на каждом следующем иерархическом уровне анализа схема работ должна повторяться, но ее элементы будут иметь свое содержание в зависимости от используемых методов и технических средств.

Принцип неповреждаемости состоит в том, что объект анализа, прошедший i -ю операцию, должен не иметь повреждений (дефектов), внесенных этой операцией и создающих помехи $(i+1)$ -й операции или возможность ошибочного установления причины возникновения дефектов на $(i+1)$ -й операции.

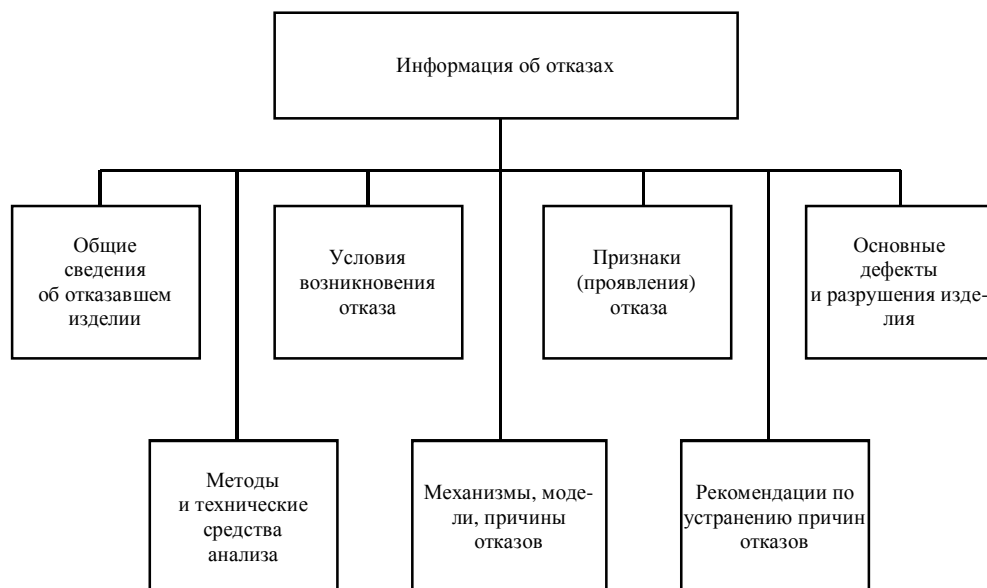


Рис. 6.2. Структура информации об отказах

Принцип метрологической совместимости состоит в обеспечении соответствия метрологических характеристик методов и средств анализа требуемой достоверности результатов анализа.

Принцип производительности состоит в обеспечении возможности анализа за требуемое время всех отказавших изделий, а в них – всех дефектов и других факторов, действие которых могло привести к отказу, т.е. в обеспечении возможности иметь необходимый уровень оперативности и глубины анализа.

Реализующие указанные принципы САО представляют собой совокупность методов и средств анализа отказов и способов анализа информации для разработки мероприятий по предотвращению отказов. Такая система сочетает организационную и научно-техническую подсистемы, является неотъемлемым элементом комплексных систем управления надежностью.

При построении САО возникают специфические проблемы определения рациональной совокупности методов и средств диагностирования, выбора контролируемых параметров для диагностирования изделий, определения рациональной структуры САО и построения на этой основе САО основных типов узлов, блоков и групп ЭРИ.

6.2. Алгоритмы и процедуры проведения анализа отказов

При проведении работ по анализу отказов необходимо соблюдать алгоритмы и процедуры, исключающие потерю информации об отказах и обеспечивающие достоверное установление причин и механизмов их возникновения [53].

Обобщенный алгоритм проведения физико-технического анализа отказов РЭС приведен на рис. 6.3. Он включает диагностику отказавшего РЭС и, в зависимости от ее результатов, либо исследование причин отказа элементов РЭС, выявленных при диагностике, либо исследование признаков, проявлений и характера отказа комплектующих ЭРИ.

При диагностике отказавшего РЭС проводится контроль его работоспособности как встроенными, так и автономными техническими средствами контроля для выявления признаков, проявлений и характера отказа. По результатам контроля проводится локализация отказавшего узла РЭС (блока, субблока, типового элемента замены). Далее проводится диагностика отказавшего узла РЭС с целью локализации отказавшего элемента (межсоединения, разъема, печатной платы, ЭРИ и др.). По результатам диагностики РЭС должен быть выявлен конструктивно-технологический элемент, вызвавший отказ. В случае неподтвердившихся или перемежающихся отказов должны быть предусмотрены дополнительные процедуры проверки узла в режимах и условиях, в которых зафиксирован отказ, или использования дополнительных провоцирующих воздействий климатических, механических и других факторов, в том числе в предельно допустимых режимах. Следует учитывать, что при невозможности получения однозначного вывода о виде и причине отказа в штатном образце оборудования КА вследствие перемежающего характера отказа должна проводиться замена всех элементов цепочки, потенциально ответственных за возникновение зафиксированного несоответствия.

Если в результате диагностики РЭС установлено, что отказ произошел по вине конструктивно-технологических элементов (печатные платы, межсоединения, разъемы и др.), проводится исследование причин отказов этих элементов. Для установления характера, признаков и проявлений отказа проводится проверка токопрохождения в цепях, измерение сопротивлений на печатных платах, оптико-микроскопический анализ отказавшего элемента для выявления дефектов (обрывов, коротких замыканий, коррозионных разрушений и т.д.).

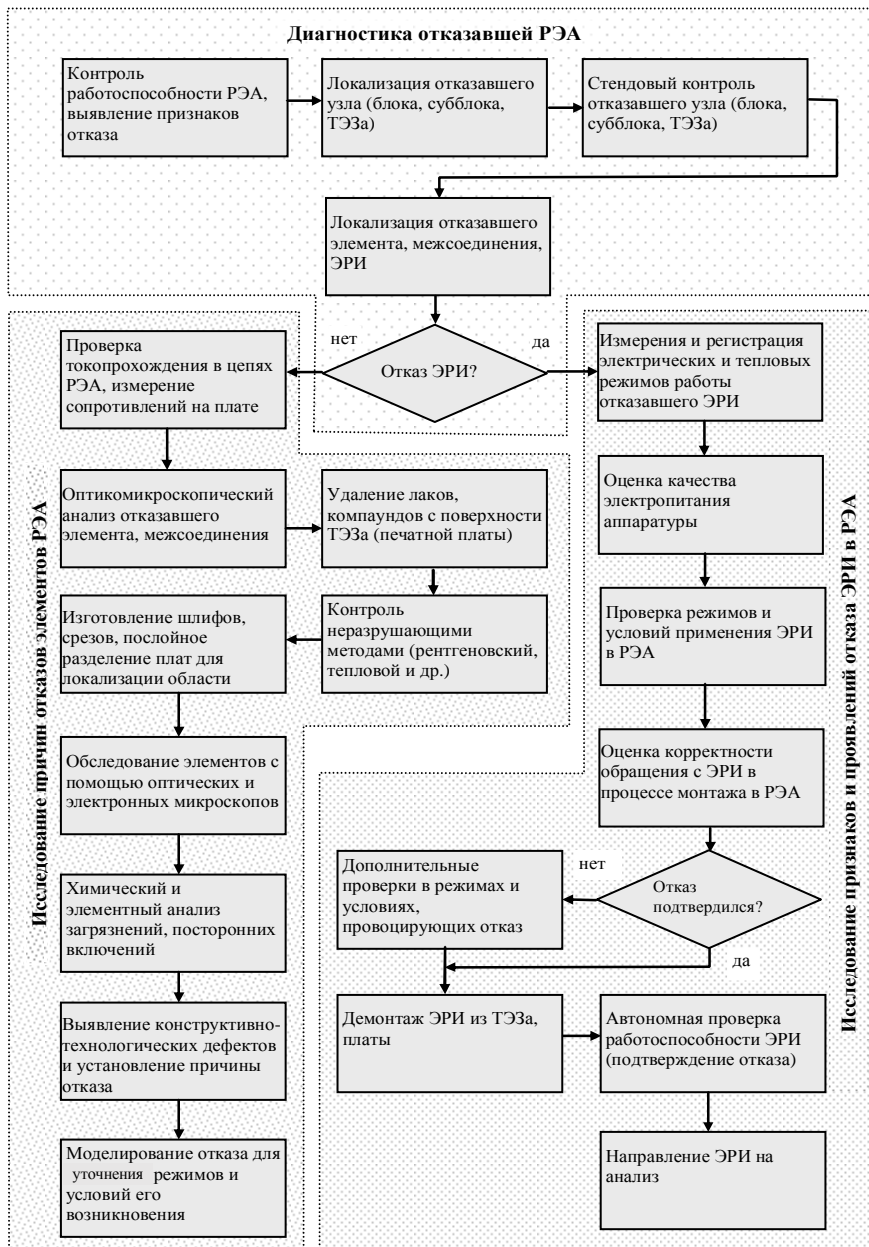


Рис. 6.3. Обобщенный алгоритм проведения физико-технического анализа отказов радиоэлектронной аппаратуры

Для обеспечения более детального обследования проводится удаление лаков, компаундов с поверхности печатной платы. Для выявления возможных скрытых

дефектов проводится контроль неразрушающими методами (тенева рентгенография, обследование с использованием микропирометров, тепловизоров и др.). Для исследования внутренней конструкции элементов (например, качества металлизированной разводки многослойных печатных плат, качества контактов между слоями, качества паек и др.) и локализации области отказа проводится изготовление шлифов, послойное разделение печатных плат.

С целью выявления дефектов элементы конструкции, шлифы обследуются под большим увеличением с использованием оптических и растровых электронных микроскопов. При выявлении загрязнений, посторонних включений, продуктов коррозии проводится их химический и элементный анализ с использованием методов инфракрасной спектроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, а также в случае необходимости более чувствительными аналитическими методами. На основании полученных результатов делается заключение о причине отказа элемента РЭС. В случае необходимости, а также для уточнения режимов и условий возникновения отказа проводится физическое и (или) математическое моделирование отказа [52, 56].

Процедуры демонтажа ЭРИ из состава платы должны исключать недопустимые электрические, механические, тепловые и другие воздействия, способные внести дополнительные разрушения и дефекты в ЭРИ и нарушить целостность изделий. Для ЭРИ, чувствительных к электрическим перегрузкам, должны быть предусмотрены меры по защите от их воздействия, в том числе от разрядов статического электричества.

После демонтажа ЭРИ из платы перед направлением ее на анализ проводится контроль ее электрических параметров и проверка функционирования на предмет подтверждения факта отказа, в том числе с использованием дополнительных провоцирующих воздействий климатических, механических и других факторов. Эта операция имеет целью дополнительно убедиться в том, что отказ аппаратуры связан с отказом ЭРИ.

Обобщенный алгоритм проведения физико-технического анализа отказов ЭРИ приведен на рис. 6.4.

На этапе подтверждения отказа ЭРИ проводится контроль электрических параметров, используются электрофизические методы анализа, контроль функционирования с применением специализированных тестеров, контроль герметичности, применение неразрушающих методов контроля, в том числе рентгеновских теневых методов, методов анализа вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Для повышения информативности результатов, получаемых на данном этапе, проводятся процедуры диагностирования, предусматривающие проверку работоспособности ЭРИ при различных питающих напряжениях, при варьировании рабочих частот и уровней входных сигналов. Для этих целей используются установки функционального контроля ИС, а также мультиметры, характериографы. Важной составляющей данного этапа является контроль содержания паров воды в подкорпусном объеме ЭРИ, имеющих свободный объем (для ИС и ПП), с применением системы газового анализа.

В результате проведения исследований на данном этапе определяются выводы и цепи, вызывающие нарушение функционирования, устанавливаются состояния, при которых проявляется отказ, регистрируются параметры, характеризующие состояние отказа. На основе схмотехнического анализа и результатов измерений, полученных на первом этапе анализа, можно предположительно локализовать отказавший элемент или группу элементов.

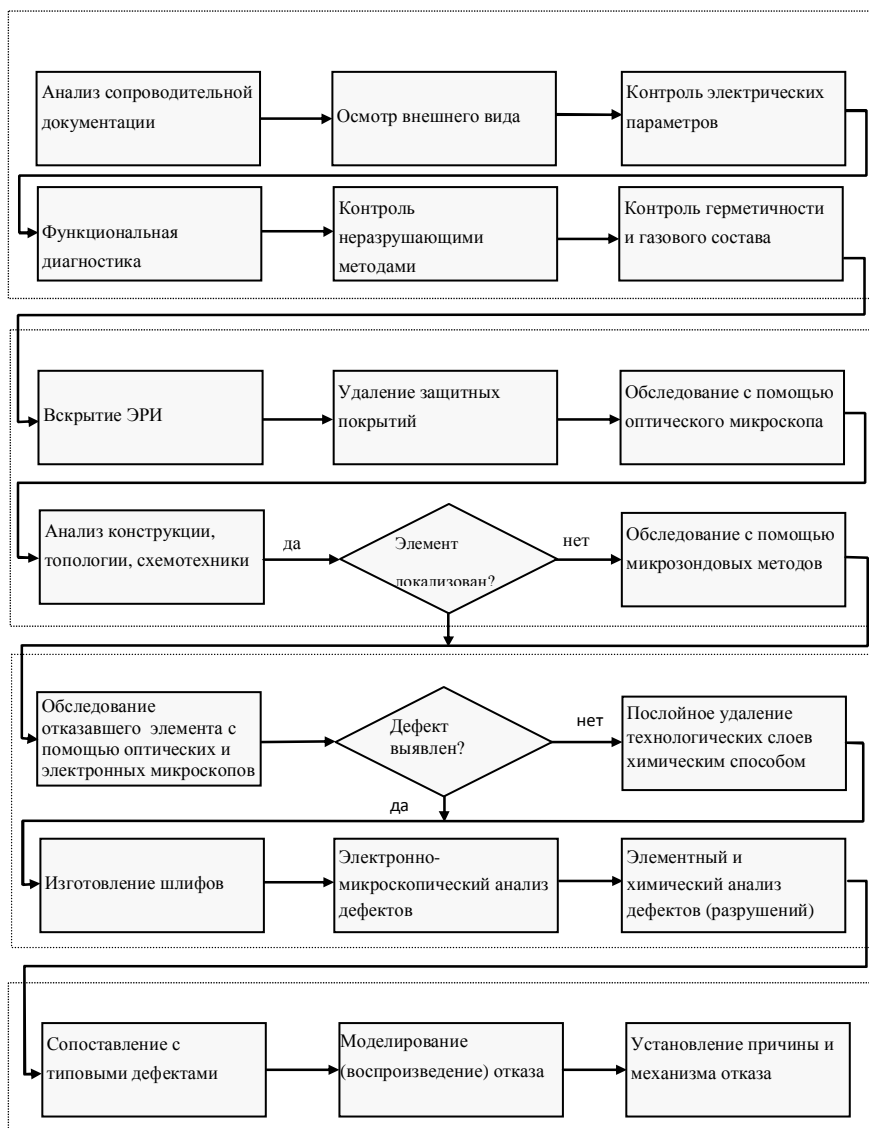


Рис. 6.4. Обобщенная блок-схема алгоритма анализа отказов ЭРИ

На этапе локализации отказавшего элемента проводится вскрытие прибора, удаление технологических защитных покрытий химическими или плазмохимическими методами, обследование с использованием оптических микроскопов, микронзондовых установок, позволяющих изолировать элементы ЭРИ друг от друга и проводить электрические измерения их параметров, и динамических электронных тестеров. В результате исследований, проведенных на данном этапе, определяется конструктивно-технологический элемент, ответственный за отказ.

На этапе выявления (визуализации) дефектов (разрушений), ответственных за отказ, и их исследования проводятся обследования конструктивно-технологических элементов, локализованных на предыдущем этапе, с использованием оптических и электронных микроскопов. Так как дефекты (разрушения) не всегда могут быть выявлены без дополнительных разрушающих операций анализа, проводятся операции послойного химического (селективного, шлифующего, полирующего) удаления технологических слоев в зависимости от характера дефектов (разрушений). После каждой операции проводится обследование с использованием оптического и электронного микроскопов с целью визуализации дефектов (разрушений). В результате исследований, проведенных на данном этапе, выявляется дефект, ответственный за возникновение отказа, определяется причина его возникновения. При классификации дефектов должны быть использованы классификаторы дефектов, а также альбомы фотографий характерных дефектов изделий.

На этапе установления причины и механизма отказа проводятся исследования элементного и химического состава отказавших элементов и деталей, выявленных загрязнений и посторонних включений с применением аналитических методов исследований (методов ренгеноспектрального микроанализа электронной оже-спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии, рентгеновской микродифракции, ИК-спектрофотометрии и др.). Осуществляется обобщение и анализ данных, полученных на предыдущих этапах анализа, после чего делается окончательное заключение о механизме и причине отказа.

При необходимости проводится моделирование и воспроизведение отказов для подтверждения результатов анализа и уточнения режимов и условий возникновения отказа.

Анализ полученных результатов включает учет сведений о статистике отказов, сопоставление результатов физико-технического анализа с накопленными данными (картотеками типичных дефектов, характерных видов дефектов аналогичных элементов с заведомо известными причинами, полученными при физическом моделировании отказов).

Результаты анализа должны быть документированы с приложением соответствующих фотографий дефектов, спектров с характеристиками дефектов и исходных материалов, а также других необходимых материалов (в том числе результатов моделирования и воспроизведения отказов), описывающих и объясняющих причины и механизмы возникновения отказа(ов).

Достоверное установление причин и, что принципиально важно, механизмов отказов является необходимым условием разработки эффективных корректирующих и предупреждающих действий, направленных на предотвращение отказов.

Для устранения установленных исследованием причин несоответствия разрабатываются конкретные варианты. Выбор наилучшего из них осуществляется различными методами: расчетными, методом «мозгового штурма», коллективного генерирования идей (решений), методом творческой дискуссии и др. Основным критерием выбора наилучшего варианта является его способность предотвратить или свести к минимуму случаи повторного возникновения причин отказов (дефектов).

Далее приведены данные об особенностях анализа отказов ЭРИ, связанных с наиболее часто встречающимися видами отказов: отказы из-за пробоев и пережогов, коррозионные отказы.

6.3. Отказы интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, связанные с утечками, пробоями и пережогами

Под отказом ИС и ПП, связанным с утечкой, пробоем и (или) пережогом, понимается потеря работоспособности приборов вследствие повреждения деталей и элементов, нарушения их структуры или разрушения внутренних соединений из-за увеличения проводимости в локальной области под воздействием электрического поля. Отказы интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, связанные с утечками, пробоями и пережогами, являются одним из наиболее распространенных видов отказов современного РЭС [55].

Проблема утечек, пробоев и пережогов является традиционной для радиоэлектроники, поскольку все ЭРИ работают под электрической нагрузкой. Но если в РЭС ранних поколений пробой были характерны для сравнительно высоковольтных цепей (электровакуумных приборов, мощных диодов и транзисторов), то в современной аппаратуре они стали более распространенным явлением и охватывают значительную номенклатуру изделий электронной техники, главным образом микроэлектроники. Объективно это связано с дальнейшей миниатюризацией ЭРИ и прежде всего с увеличением степени интеграции ИС: уменьшением геометрических размеров элементов, снижением толщин диэлектриков и глубин залегания $p-n$ -переходов, увеличением сложности и энергонасыщенности современных РЭС, усложнением электромагнитной обстановки, наличием разнообразных электромагнитных полей при производстве, транспортировке и эксплуатации РЭС и комплектующих ее элементов. Это привело к тому, что отказы ЭРИ из-за пробоев достигают по данным различных источников 40–50% всех отказов на начальных этапах их жизненного цикла и 20–25% на последующих.

Следует также отметить достаточно высокую цену отказов, связанных с пробоями. Она велика потому, что пробой, в отличие от некоторых других видов

отказов, связанных с наличием в ЭРИ явных производственных дефектов (которые можно отбраковать до установки в РЭС), довольно часто возникают на стадии эксплуатации РЭС, что может повлечь за собой значительные экономические потери и серьезные юридические последствия. Кроме того, важной особенностью отказов, связанных с утечками, пробоями и пережогами, является их высокая конфликтность. Предприятия-изготовители приборов, как правило, связывают возникновение пробоев и утечек с нарушением режимов их применения в РЭС и воздействием на них в процессе функционирования недопустимых электрических перегрузок. Предприятия-изготовители РЭС, применяющие ИС и ПП, наоборот, считают, что отказы, связанные с пробоями и утечками, являются следствием низкого качества приборов и вызваны наличием в них производственно-технологических дефектов. Как показывает практика, конфликтные ситуации по отказам из-за пробоев и утечек возникают чаще, чем по другим видам отказов. Возникновение конфликтных ситуаций между изготовителями и потребителями ИС и ПП обусловлены не только корпоративными интересами, что, как показывает практика, весьма существенно, а, главным образом, значительными трудностями проведения анализа таких отказов. Сложность в исследовании отказов из-за пробоев, утечек и пережогов заключается в том, что возникновение этих отказов может быть связано с воздействием взаимосвязанных и взаимозависимых факторов, охватывающих этапы разработки и производства ИС, режимы и условия их применения в РЭС, особенности эксплуатации. В связи с этим по критериям АВПКО отказы из-за утечек, пробоев и пережогов имеют высокий коэффициент риска (Кр). Задача анализа и предотвращения отказов из-за утечек, пробоев и пережогов является комплексной. Она должна включать такие составляющие, как исследование физических механизмов и процессов возникновения пробоев и утечек в ИС и ПП; исследование источников электрических перегрузок в производстве и эксплуатации РЭС и ЭРИ; исследование и выявление дефектов изготовления ИС и ПП, вызывающих возникновение пробоев и утечек в ИС; порядок и особенности анализа отказов по установлению причин и механизмов возникновения пробоев и утечек в ИС; разработка корректирующих мероприятий по предотвращению отказов из-за пробоев и утечек.

Виды и механизмы возникновения утечек, пробоев и пережогов

Отказы ИС и ПП из-за утечек, пробоев и пережогов проявляются в виде обрывов электрических цепей, коротких замыканий и утечек во входных цепях, нарушений функционирования приборов. Имеется три основных вида разрушений в ИС и ПП при возникновении в них утечек, пробоев и пережогов:

- пробой (утечка) $p-n$ -перехода в ПП (диоды, транзисторы) и в активных элементах ИС;
- пробой (утечка) в пассивирующих окислах и подзатворных диэлектриках;
- перегорание металлизированной разводки на кристалле ИС или внутренних проволочных выводов, соединяющих кристалл с внешними выводами приборов.

Механизм пробоя p - n -перехода в основном связан с тепловой перегрузкой и состоит в следующем. Величина удельного сопротивления легированного кремния зависит от температуры и уровней легирования (рис. 6.5). Наклон графика зависимости удельного сопротивления от температуры является положительным при комнатной температуре и температуре нормальных режимов работы приборов. При повышенных температурах (200°C и выше) наклон этого графика становится отрицательным, т.е. существует принципиальная электрическая и тепловая нестабильность легированного кремния.

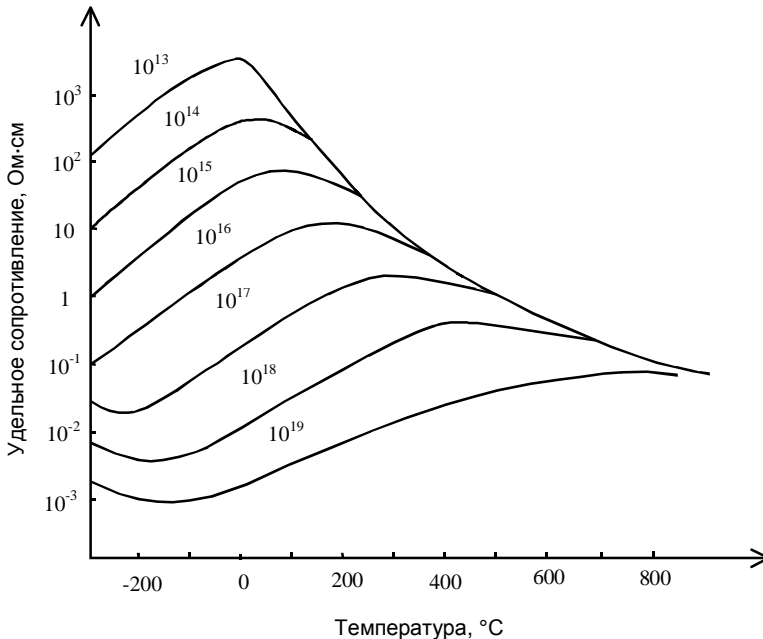


Рис. 6.5. Зависимость удельного сопротивления кремния от температуры для различных уровней легирования (нанесены на графике)

При протекании электрического тока через кремний происходит его разогрев, зависящий от величины тока, конструкции прибора, условий теплоотвода. На участке с положительным наклоном графика нагрев и распределение плотности тока по площади сравнительно однородны, и сопротивление увеличивается с ростом температуры. При нагреве до температуры 200°C и выше (например, при воздействии электрической перегрузки, работе при повышенных температурах, влиянии дефектов в кремнии, лавинном пробое p - n -перехода и т.п.) всегда существующие неоднородности в структуре вызовут локальный нагрев областей кремния до температур, при которых зависимость удельного сопротивления имеет отрицательный наклон. С этого момента с ростом температуры сопротивление в этих областях начинает уменьшаться вследствие отрицательной зависимости удельного сопротивления от температуры. Ток с других

участков кремния стягивается в эти области, формируя одно или несколько локальных «горячих пятен», образуя шнуры тока. Температура в «горячих пятнах» резко возрастает, а сопротивление падает, что приводит к еще большему стягиванию тока в шнуры. Если через кремниевую структуру проходит ток достаточной мощности, то этот процесс продолжается до расплавления кремния в «горячих пятнах». Как только это происходит, кристаллическая структура кремния нарушается. Если нарушение структуры кремния проходит через границу $p-n$ -перехода, то в нем появляется канал утечки, и он перестает обладать выпрямительными свойствами. Сопротивление канала утечки зависит от степени разрушений, определяемых мощностью тока, и может изменяться в широких пределах. Если участок расплавленного кремния доходит до металлических контактов и остается расплавленным достаточно долго, то металл контактов, например алюминий, мигрирует в расплавленный участок цепи. После охлаждения и рекристаллизации в этом случае может возникнуть закоротка с очень маленьким сопротивлением порядка нескольких ом. Следует отметить, что механизм пробоя одинаков и для прямого, и для обратного смещения $p-n$ -перехода. Однако при обратном смещении за счет обеднения области перехода основными носителями его сопротивление становится очень большим, рассеиваемая мощность при одинаковом токе существенно возрастает, поэтому явление пробоя наиболее часто встречается для обратносмещенных $p-n$ -переходов. Величина тока, необходимая для пробоя прямосмещенного перехода, в 5–15 раз больше, чем для обратносмещенного перехода. Если рассматривать транзисторы как отдельные приборы или в составе ИС, то наиболее уязвимым к пробоям является переход эмиттер – база, в связи с его малыми размерами, более высоким уровнем легирования области эмиттера и, следовательно, более высокими значениями протекающего тока. На рис. 6.6 приведен пример типичного пробоя $p-n$ -перехода в биполярной ИС с расплавлением кремния, миграцией алюминия (материала металлизированной разводки) в канал пробоя возникновением закоротки с сопротивлением величиной в несколько ом.

Механизмы пробоя окислов и подзатворных диэлектриков связаны, в основном, с явлениями ударной ионизации-рекомбинации. Под действием приложенного электрического поля свободные электроны при движении в окисле достаточной толщины на длине свободного пробега успевают получить энергию для ударной ионизации атомов матрицы и создания электронно-дырочных пар. Вследствие большой подвижности электроны оставляют позади себя облако положительно заряженных дырок, которые создают ускоряющее поле для других электронов. Таким образом, в системе ударной ионизации появляется положительная обратная связь, способствующая лавинному размножению носителей и наступлению пробоя. Помимо высокой напряженности поля, необходимой для развития пробоя, этому способствует наличие неоднородностей, дефектов в окисле. В местах сужений диэлектрических слоев и на остриях выступов (например, поры в окисле) могут возникнуть повышенные напряженности электрического поля, приводящие к пробоям.

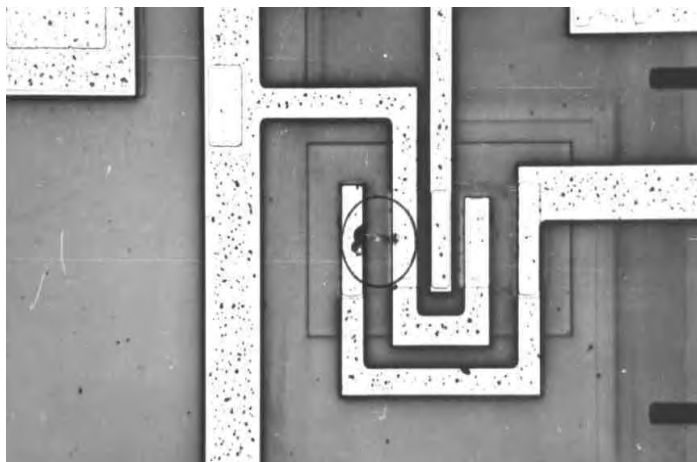


Рис. 6.6. Типичный вид пробоя p - n -перехода в ИС. Фотография получена с использованием оптического микроскопа после вскрытия корпуса ИС

Вторым важным механизмом, приводящим к возникновению пробоя тонких диэлектриков при воздействии электрического поля, является инжекция «горячих электронов» из кремния в SiO_2 . «Горячие электроны» – это высокоэнергетические носители, образующиеся при лавинном пробое p - n -перехода или в области повышенного электрического поля вблизи стока МОП-транзисторов ИС с коротким каналом. Под воздействием поля электроны приобретают значительную энергию. В результате рассеивания на атомах решётки создается поток электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе раздела кремний – двуокись кремния и проникнуть в подзатворный диэлектрик.

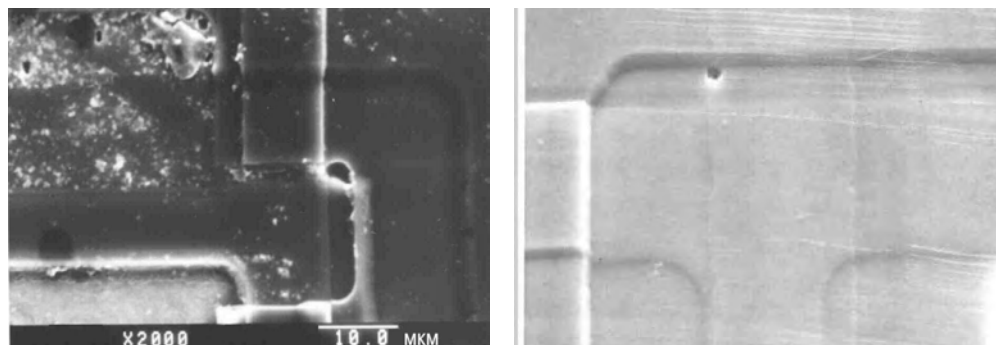
Пробой и разрушение диэлектрика происходят значительно быстрее, чем пробой p - n -перехода (менее 10^{-7} с). Для того чтобы разрушить пленку диэлектрика в ИС, требуется очень незначительная энергия (единицы микроджоулей).

Основным механизмом перегорания шин металлизации и внутренних проводочных выводов является их джоулев разогрев при протекании электрического тока. Перегорание происходит при достижении температуры плавления материала металлизации и внутренних выводов. В процессе перегорания происходит расплавление металла и обрыв цепи. Если напряжение в месте разрыва цепи достаточно велико, то может возникнуть электрическая дуга, действие которой приводит к испарению металла и значительным повреждениям металлизации.

Анализ отказов ИС и ПП, связанных с утечками, пробоями и пережогами

Применительно к отказам ИС и ПП с наличием в них утечек, пробоев и пережогов в процессе анализа отказов необходимо установить, вызван ли отказ ошибками в конструкции и дефектами их изготовления или он связан с нарушением режимов и условий применения приборов в РЭА. В первом случае необходимо

выявить недостатки конструкции или дефекты, приведшие к снижению электрической прочности ИС и ПП и возникновению пробоя, установить причины их появления и предусмотреть соответствующие корректирующие и предупреждающие действия. Во втором случае необходимо определить характер нарушения режимов и условий применения, оценить параметры возможных электрических перегрузок, локализовать возможный источник или источники недопустимых перегрузок и устранить или уменьшить их влияние на ИС и ПП при внедрении корректирующих и предупреждающих действий [57].



Дефект подзатворного диэлектрика КМОП ИС (пустоты)

Пробой подзатворного диэлектрика КМОП ИС в результате воздействия разряда статического электричества

Рис. 6.7. Сопоставление изображений дефектов в КМОП ИС, вызвавших отказы с одинаковыми признаками (короткое замыкание между одним из входов ИС и общим выводом)

Отказы, связанные с утечками, пробоями и пережогами, сложны для анализа. Сложность проведения анализа таких отказов состоит в том, что признаки и проявления, устанавливаемые при диагностировании отказа, практически совпадают как при отказах из-за нарушения режимов и условий применения ИС и ПП, так и при отказах из-за дефектов изготовления. На рис. 6.7 приведено сопоставление двух фотографий КМОП ИС с одинаковыми признаками отказа (короткое замыкание между одним из входов ИС и общим выводом). В одном случае причиной отказа стало воздействие разряда статического электричества, приведшее к пробую подзатворного диэлектрика. В другом случае отказ возник из-за утечки по дефекту изготовления ИС (некачественное нанесение подзатворного диэлектрика). Важным обстоятельством, существенно затрудняющим установление причины отказа, является также то, что дефекты и разрушения, ответственные за отказ, могут иметь очень малые размеры (единицы микрон) и располагаться в объеме кристаллов ИС и ПП под различными технологическими слоями (шинами металлизации, изолирующими и пассивирующими окислами). Для установления причины отказа требуется их выявление, визуализация и анализ, что связано с необходимостью применения сложного и прецизионного

оборудования и определения совокупности и правильной последовательности использования методов анализа. При анализе случаев существует опасность уничтожения дефектов (разрушений), ответственных за отказ, при разрушающих операциях анализа и потери информации, необходимой для установления причины отказа.

Фотографии на рис. 6.7 получены с использованием растрового электронного микроскопа после послойного удаления с поверхности кристалла пассивирующего окисла и металлизированной разводки.

*Влияние электрических перегрузок на возникновение отказов
из-за утечек, пробоев и пережогов*

Довольно распространенной является ситуация, при которой в процессе исследований отказавшего изделия обнаруживаются очевидные и бесспорные свидетельства того, что были превышены максимально допустимые режимы и условия применения ЭРИ в РЭА (отказ сразу нескольких изделий с обширными разрушениями, связанными с протеканием больших токов). В то же время тщательный схемотехнический анализ показывает, что в большинстве случаев отказов из-за пробоя режимы работы и условия применения ЭРИ в РЭС, проверяемые по картам рабочих режимов, не нарушены. В этом случае говорят о воздействии на ЭРИ кратковременных электрических перегрузок. Как правило, многие процессы и явления, связанные с воздействием кратковременных электрических перегрузок, носят случайный характер и не всегда учитываются при конструировании и производстве РЭС и ЭРИ.

На всех этапах жизненного цикла на ИС и ПП неизбежно воздействуют разнообразные электрические перегрузки, способные привести к отказам приборов. Подробно основные виды электрических перегрузок, их параметры и источники рассмотрены в разд. 2.

Кратко рассмотрим результаты воздействия на ЭРИ различных видов электрических перегрузок.

При воздействии разрядов статического электричества в ИС и ПП, как правило, происходят незначительные разрушения малых размеров (единицы микрон), которые практически невозможно выявить и идентифицировать без использования растрового электронного микроскопа и послойного удаления технологических слоев (пассивирующих окислов, металлизированной разводки, основных окислов, послойного (шлифующего или полирующего) травления кремния и др.). Пример дефекта, возникшего в результате воздействия разрядов статического электричества, приведен на рис. 6.8. Следует отметить, что разряды статического электричества воздействуют на всех стадиях жизненного цикла ИС и ПП.

Фотография, показанная на рис. 6.8, получена с использованием растрового электронного микроскопа после послойного удаления с поверхности кристалла пассивирующего окисла и металлизированной разводки, удаления основного окисла, металлизации и полирующего травления кристалла.

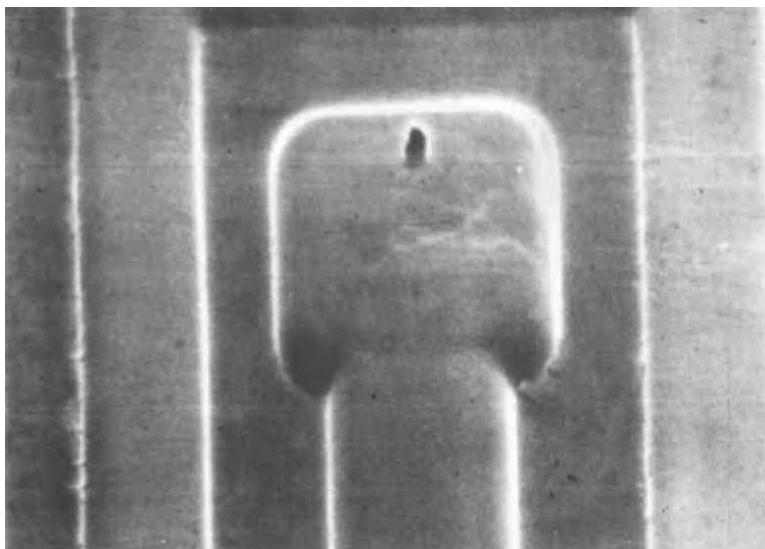


Рис. 6.8. Типичный вид пробоя p - n -перехода с вертикальной структурой в схеме защиты входа КМОП ИС, вызванный воздействием разряда статического электричества

На этапы производства и испытаний РЭА приходится, как правило, наибольшая доля отказов ИС и ПП из-за пробоев и пережогов. Это связано с тем, что на этом этапе изделия подвергаются наибольшим манипуляциям со стороны обслуживающего персонала, к ним прикладываются электрические нагрузки в самом широком диапазоне напряжений, нередко превышающие предельно допустимые значения.

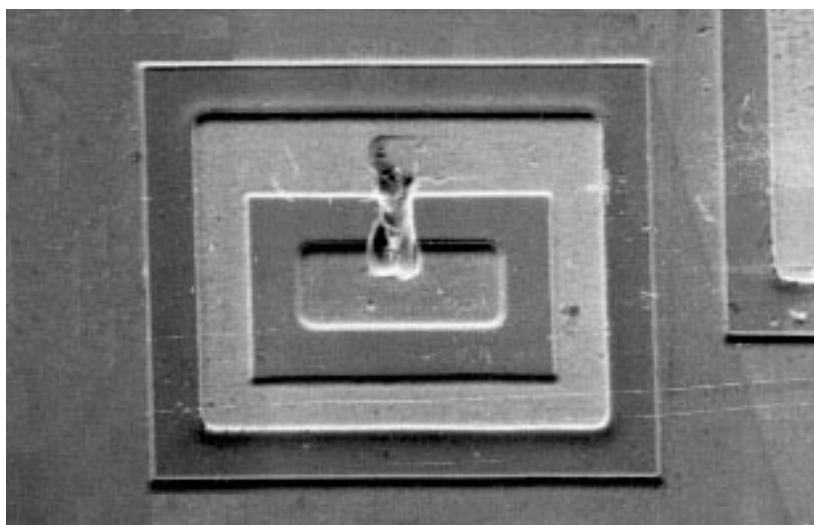
Одними из распространенных причин возникновения пробоев и пережогов при производстве и испытаниях РЭА являются низкое качество, а нередко и отсутствие системы заземления аппаратуры, а также отсутствие в стандартных разъемах специальных штырей, обеспечивающих опережающий контакт нулевых и заземляющих шин.

На рис. 6.9 приведены примеры типичных разрушений в приборах, возникших в результате воздействия электрических перегрузок при производстве и испытаниях РЭА.

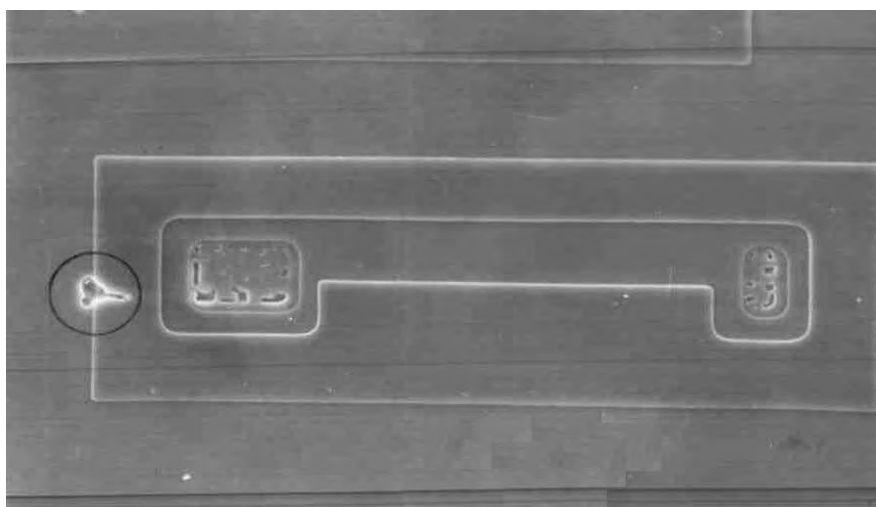
Фотографии на рис. 6.9 получены с использованием растрового электронного микроскопа после послыонного удаления с поверхности кристалла пассивирующего окисла и металлизированной разводки, основного окисла и селективного травления кремния.

При эксплуатации РЭА на ИС и ПП может воздействовать целый комплекс электрических перегрузок (ЭМИ, молния, СВЧ-излучение, нестационарные процессы в системах электроснабжения, перенапряжения из-за несовершенства контрольно-измерительной аппаратуры, а также разряды статического и наве-

денного электричества). При эксплуатации в условиях комплексного воздействия внешних факторов в наибольшей степени проявляются нарушения режимов и условий применения ЭРИ в РЭА. Поэтому в процессе эксплуатации могут возникать наиболее обширные разрушения в ИС и ПП, связанные с воздействием мощных электрических перегрузок.



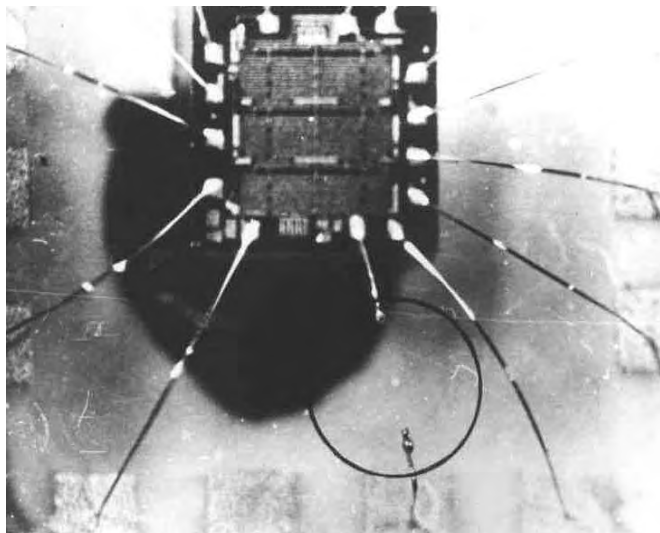
Пробой $p-n$ -перехода эмиттер – база транзистора в составе биполярной ИС



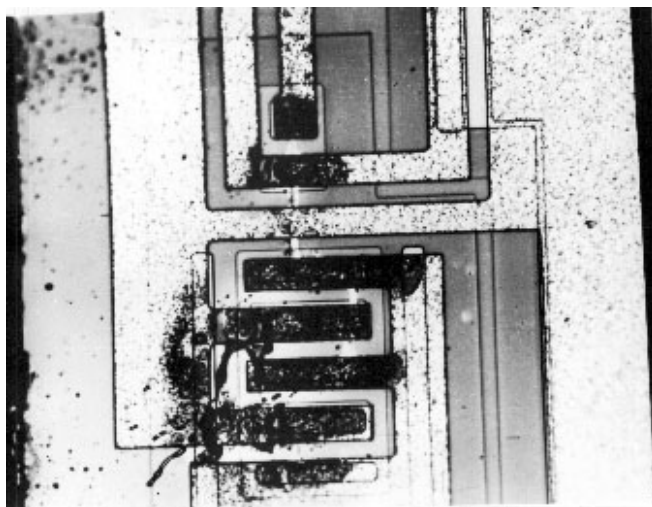
Пробой основного окисла в области устройства защиты входа КМОП ИС

Рис. 6.9. Характерные разрушения в приборах, возникшие в результате воздействия электрических перегрузок при производстве и испытаниях РЭС

На рис. 6.10 приведены примеры типичных разрушений в ИС и ПП, возникших в результате воздействия электрических перегрузок при эксплуатации РЭС.



Пережог внутреннего проволочного вывода ИС. Фотография получена с использованием оптического микроскопа после вскрытия ИС



Пробои активных элементов (транзисторов) и пережоги металлизированной разводки в биполярной ИС. Фотография получена с использованием оптического микроскопа после вскрытия ИС

Рис. 6.10. Характерные разрушения в приборах, возникшие в результате воздействия электрических перегрузок при эксплуатации РЭС

*Влияние качества изготовления ЭРИ на возникновение отказов
из-за утечек, пробоев и пережогов*

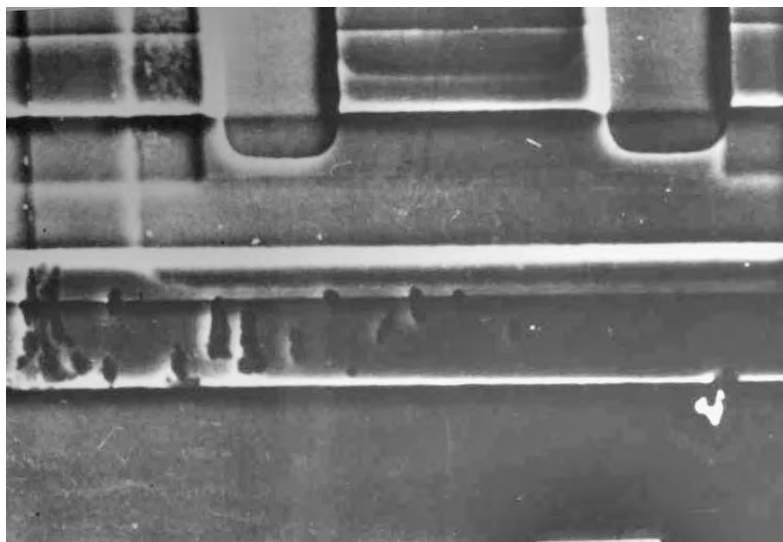
Наряду с электрическими перегрузками существенную роль в возникновении пробоев и утечек играют производственно-технологические дефекты ЭРИ. Проявление дефектов заключается в снижении электрической прочности элементов ЭРИ и в том числе стойкости к воздействию электрических перегрузок. Наличие дефектов в активных элементах ИС и ПП приводит к возникновению в них неустойчивых состояний и способствует развитию процессов, приводящих к пробоям, – повышению напряженности поля, шнурованию тока. Процессы активизируются под воздействием внешних дестабилизирующих факторов (повышенной температуры, электромагнитных полей и др.), нестабильности источников питания, что может вызвать возникновение пробоев в ИС и ПП без нарушения режимов их применения в составе РЭС.

Влияние производственно-технологических дефектов может проявляться при значительных наработках ИС и ПП в РЭС.

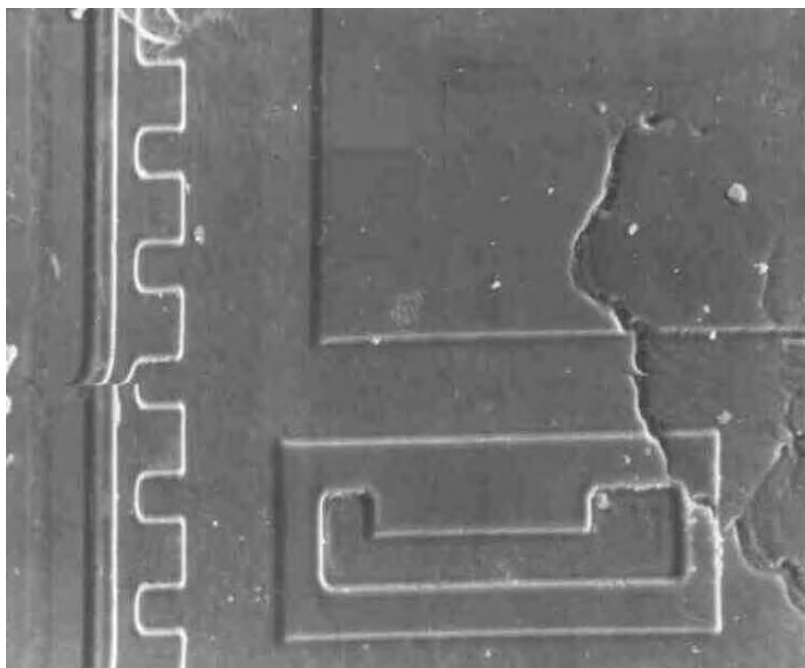
Дефекты, снижающие электрическую прочность ИС и ПП и приводящие к возникновению пробоев, можно условно разделить на дефекты, связанные с кристаллической структурой полупроводникового материала, применяемого для изготовления приборов, и дефекты, вносимые в процессе различных операций по формированию элементов ИС. К первым относятся дефекты, которые образуются на операциях эпитаксии, диффузии, окисления, ионной имплантации и др. Ко вторым относятся дефекты, вносимые при литографии, травлении, нанесении металлизации. Наиболее распространенными и опасными дефектами кристаллической структуры, приводящими к снижению электрической прочности и возникновению пробоев активных элементов в ИС и ПП, являются дислокации. Наличие дислокаций обуславливает появление новых энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводниковых материалов, способствует возникновению неоднородностей в активных элементах, что приводит к снижению электрической прочности элементов, стягиванию тока в шнуры при высоких его плотностях и возникновению пробоев. Существенную роль в снижении электрической прочности активных элементов ИС играют дефекты упаковки, образующиеся в процессе роста эпитаксиальных структур. Они возникают в результате нарушения закономерности чередования атомных слоев кристаллической решетки относительно ориентированной плоскости роста.

Наиболее типичными дефектами, приводящими к пробую активных элементов ИС и вносимыми в процессе формирования элементов, являются дефекты изолирующих окислов и подзатворных диэлектриков (для МОП ИС), дефекты фотолитографии, сборки.

Следует также отметить, что с ростом микроминиатюризации приборов дефекты изготовления становятся более критичными и чаще приводят к возникновению пробоев и утечек. На рис. 6.11 приведены примеры характерных дефектов приборов, снижающих их электрическую прочность и приводящих к возникновению пробоев и утечек.



Дефекты основного окисла под шинами металлизации, приведшие к возникновению утечки в ИС



Дефект структуры кристалла ИС – микротрещина, проходящая через активную область схемы защиты входа и контактную площадку

Рис. 6.11. Примеры дефектов изготовления ИС, снижающих их электрическую прочность и приводящих к возникновению пробоев и утечек

Особенности анализа отказов ИС и ПП, связанных с утечками, пробоями и пережогами

Физико-технические исследования причин возникновения утечек, пробоев и пережогов производятся в соответствии с общим алгоритмом проведения анализа отказов ЭРИ. При проведении анализа необходимо учитывать определенные особенности для достоверного установления причины отказа.

1. По возможности при сборе фактов об отказах ИС и ПП, связанных с пробоями и утечками, необходимо получить ответы на следующие основные вопросы: на каком этапе жизненного цикла обнаружен отказ (производство, входной контроль, изготовление, испытание или эксплуатация РЭА); производились ли какие-либо операции непосредственно перед обнаружением отказа, в том числе ремонт, профилактические и регламентные работы с РЭА или контроль измерительным и испытательным оборудованием, включая перестыковку кабелей, поиск других неисправностей и т.п.; работала ли РЭА в момент отказа ИС под нагрузкой или отказала в момент подачи питания, включения (отключения) другого приемника электроэнергии или переключения на другой источник энергоснабжения; есть ли в аппаратуре источники кратковременных выбросов высокого напряжения (например, разряды в высоковольтных электровакуумных приборах, источники мощного СВЧ-излучения и др.); приняты ли меры по подавлению электрических перегрузок из-за бросков тока уравнивания потенциалов и емкостных токов при сочленении (расчленении) съемных узлов (блоков) РЭС при монтаже (ремонте) РЭС; не связан ли отказ с воздействием других источников электрических перегрузок (молния, разряды статического электричества, нестационарные процессы в системах электропитания и т.п.); обнаружены ли в отказавшем блоке, узле РЭС отказы других электрорадиоизделий, и не могли ли они привести к воздействию электрических перегрузок на анализируемую ИС (зависимые отказы); имеет ли отказавшая ИС непосредственный выход на разъем, контрольные точки, выводы источников питания; подтверждаются ли подобные отказы данными статистики отказов из-за воздействия электрических перегрузок с учетом этапа жизненного цикла ИС, на котором произошел отказ, отказавшей схемной позиции РЭС.

2. Информативной процедурой при анализе отказов, связанных с пробоями и утечками, является контроль вольт-амперных характеристик (ВАХ). В зависимости от конструктивно-технологических особенностей конкретных ИС и ПП при анализе ВАХ можно предположительно локализовать отказавший элемент или группу элементов.

3. Применительно к ИС необходимой и важной процедурой анализа является проверка стойкости неповрежденных элементов отказавшей ИС к разрядам статического электричества. В связи с тем, что кристалл ИС представляет собой монолитную структуру с множеством технологически и структурно-однородных элементов, представляется целесообразным проверить стойкость к электрическим перегрузкам неповрежденных элементов ИС, имеющих анало-

гичные пробитым топологию и функциональное назначение. Для ИС такая возможность, как правило, имеется, и проверка является достаточно корректной. По результатам проверки делается заключение о соответствии ИС требованиям ТУ по стойкости к разрядам статического электричества и определяются уровни стойкости ИС, характеризующие в том числе дефектность структур анализируемой ИС. Если стойкость ИС не удовлетворяет установленным требованиям, то есть основания предположить о наличии в ИС производственно-технологических дефектов и использовать полученную информацию при последующих операциях анализа.

4. Важной особенностью отказов, связанных с пробоями и утечками в ИС и ПП, является то, что при таких отказах далеко не всегда можно выявить дефекты и разрушения с использованием оптических микроскопов и тем самым локализовать отказавшие в ИС элементы. Существует ряд методов, позволяющих провести локализацию отказавших элементов. К ним относятся метод потенциального контраста растрового электронного микроскопа, метод жидких кристаллов, метод наблюдения свечения микроплазм, метод микрозондирования с использованием микрозондовой установки. Для БИС наиболее эффективным является метод потенциального контраста, позволяющий визуализировать распределение потенциалов на элементах ИС и локализовать отказавший элемент. Для ИС малой и средней степени интеграции, а частично и для БИС предпочтительно использование микрозондовой установки, позволяющей отделять друг от друга конструктивные элементы на кристалле ИС путем перерезания шин металлизации специальным ультразвуковым резаком. Применение микрозондовой установки позволяет не только локализовать отказавший элемент, но и исследовать его характеристики с помощью измерительных приборов, что весьма важно для установления причины отказа. Так, в частности, важной характеристикой пробитых элементов является остаточное сопротивление пробитых структур.

5. Локализацию отказавших элементов целесообразно проводить после удаления пассивирующего окисла, как правило, химическим или плазмохимическим способом. Для локализации пробитых элементов целесообразно изолировать друг от друга контактные площадки, схемы защиты входов ИС, входные и выходные логические элементы. В большинстве случаев этого достаточно для того, чтобы локализовать отказавший элемент.

6. При визуализации и исследовании пробитых элементов должны быть определены характер и морфология разрушений. Следует отметить большую практическую пользу для специалистов по анализу отказов документирования (в виде фотографий или компьютерных изображений) характерных разрушений и дефектов, приводящих к отказам. Наличие картотек и компьютерных баз данных характерных разрушений и дефектов по различным видам отказов существенно облегчает задачу идентификации дефектов и установление причины отказа. Если при обследовании с использованием оптических микроскопов отказавших элементов разрушения или дефекты не выявлены, необходимо обследо-

довать отказавшие элементы под большим увеличением с использованием растрового электронного микроскопа. Если эта операция анализа не позволила выявить разрушения и дефекты, то необходимо провести послойное шлифующее или полирующее химическое травление для последующего обследования локализованных отказавших элементов с использованием оптического микроскопа и РЭМ. Выявленные разрушения или дефекты должны документироваться (фотографироваться).

7. Вывод о причине возникновения отказов делается на основе анализа и сопоставления характера разрушений, наличия или отсутствия дефектов, снижающих электрическую прочность ИС и ПП. Если при анализе установлено наличие дефектов в элементах, имеющих утечки, и отсутствуют признаки превышения режимов и условий применения, то делается заключение о том, что причиной отказа является дефект изготовления. Если дефекты изготовления отсутствуют, стойкость логических элементов, подобных отказавшему, удовлетворяет требованиям, установлены признаки, указывающие на нарушение режимов и условий применения ИС и ПП в РЭА, то делается заключение о том, что причиной отказа является нарушение режимов и условий применения. В этом случае необходимо определить характер нарушения и оценить параметры электрических перегрузок. Это может быть сделано с использованием математических моделей и методик воспроизведения отказов.

6.4. Коррозионные отказы интегральных микросхем и полупроводниковых приборов

Механизмы коррозионных отказов, виды коррозионных разрушений

Под коррозионным отказом ИС и ПП понимается потеря работоспособности приборов вследствие коррозионного разрушения входящих в их состав тонкопленочных или объемных конструктивно-технологических элементов (КТЭ), выполненных из металла (сплава). К их числу относятся элементы металлизированной разводки на кристалле (контактные площадки, шины металлизации и др.), элементы корпуса (выводы, контактные площадки, металлизированные дорожки и др.), а также проволочные соединения между кристаллом и корпусом.

Коррозионные отказы относятся к числу основных видов отказов ИС и ПП, имеют высокий коэффициент риска в части возможных последствий. Это обусловлено малыми размерами используемых в конструкции приборов металлических КТЭ, большим разнообразием факторов, воздействующих на них при изготовлении и применении, и высоким уровнем удельных нагрузок, создаваемых этими факторами. К важным обстоятельствам, придающим особую значимость коррозионным отказам и обуславливающим их высокий K_p , является то, что они обнаруживаются после определенной наработки, как правило, у потребителя и вызывают серьезные последствия.

Коррозионные отказы ИС и ПП в составе РЭС проявляются в виде обрывов электрических цепей, отсутствия электрического сигнала на выходе или несоответствия этого сигнала карте режимов РЭА при наличии сигнала на входе (входах).

Различают два типа коррозии металлов – химическую и электрохимическую [58].

При химической коррозии окисление металла и восстановление окислительного компонента происходит в одном акте. Химическая коррозия имеет место, как правило, в высокотемпературной среде и не типична для ИС и ПП.

Для ИС и ПП характерна электрохимическая коррозия, которая происходит в присутствии электролитически проводящей среды, при этом ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала металла. Электролитически проводящей средой в ИС и ПП является пленка воды, образующаяся на поверхностях металлических КТЭ в результате осаждения из окружающей атмосферы или подкорпусного объема приборов.

Для электрохимической коррозии движущимися силами коррозионного процесса являются электродвижущие силы (ЭДС) гальванических пар (гальваническая коррозия) и ЭДС внешних источников тока (электролитическая коррозия).

Коррозия под действием ЭДС гальванических пар возникает при контакте в электролите разнородных металлов (или металла с полупроводником), обладающих различными электродными потенциалами. Типичными контактами в ИС и ПП, для которых характерна гальваническая коррозия, являются:

- контакт металлов золото – алюминий, где один из металлов является материалом контактных площадок, а другой – материалом проволочных выводов (электродный потенциал $Al = -0,750$ В; $Au = +0,25$ В);

- контакт алюминиевая металлизация – кремний боковых граней областей скрайбирования (электродный потенциал $Si = -0,30$ В);

- контакт металлов золото – железо на выводах или корпусах (электродный потенциал $Fe = -0,225$ В).

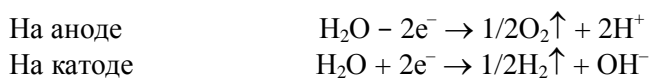
В области контакта образуется разность потенциалов. При взаимодействии металлов с электролитом происходят окислительно-восстановительные процессы. Электрохимическое окисление, при котором атом металла отдает электрон, называется анодным процессом. При этом ион металла переходит в электролит с образованием гидратированных ионов. Обратный (восстановительный) процесс происходит с восстановлением металла в виде нейтральных атомов. Это катодный (восстановительный) процесс. Эти процессы можно записать в следующем виде:



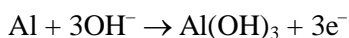
Когда металл находится в равновесии с собственными ионами в электролите, коррозии не происходит. Если в процессе взаимодействия металл – электролит участвуют не только ионы данного металла, но и другие ионы или атомы (например, загрязнения или примеси), то может быть нарушен окислительно-

восстановительный баланс: в электролит переходит больше ионов металла, чем осаждается на электроде. Происходит растворение металла и перенос его ионов в электролите под действием ЭДС-гальванопары. Таким образом, при контакте металлов с различным электродным потенциалом коррозия возникает на электроде-аноде с более отрицательным электродным потенциалом (происходит анодное растворение металла и разрушение соответствующего КТЭ).

Механизм электролитической коррозии металлизации ИС и ПП под воздействием ЭДС внешних источников тока (ее называют катодной коррозией) заключается в следующем. При приложении внешнего напряжения к электролитической ячейке проводимость электролита обеспечивается в основном ионами водорода H^+ и гидроксила OH^- , которые возникают в электролите.



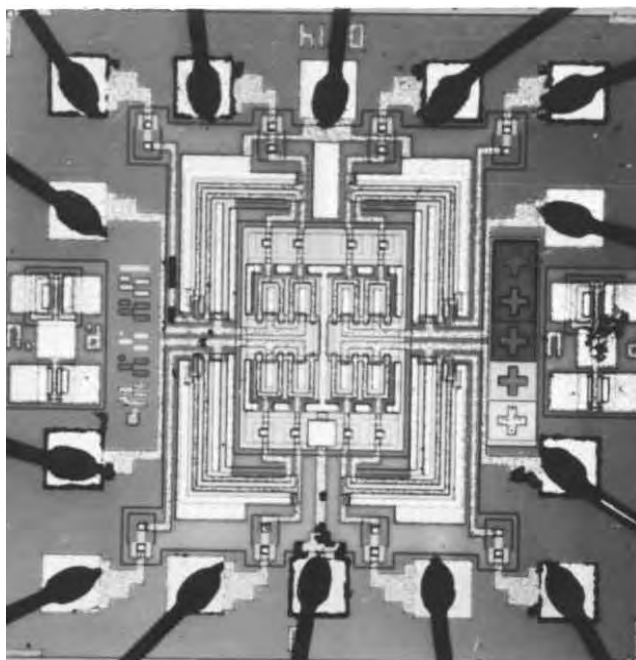
На участках металлизации ИС и ПП, находящихся под отрицательным потенциалом, возрастает концентрация OH^- и происходит локальное защелачивание, интенсивность которого зависит от приложенного напряжения и состояния пленки алюминия. В образовавшейся концентрированной щелочи происходит локальное растворение защитной пленки на алюминии (Al_2O_3) с последующей коррозией металла с образованием рыхлых продуктов (гидроксида алюминия):



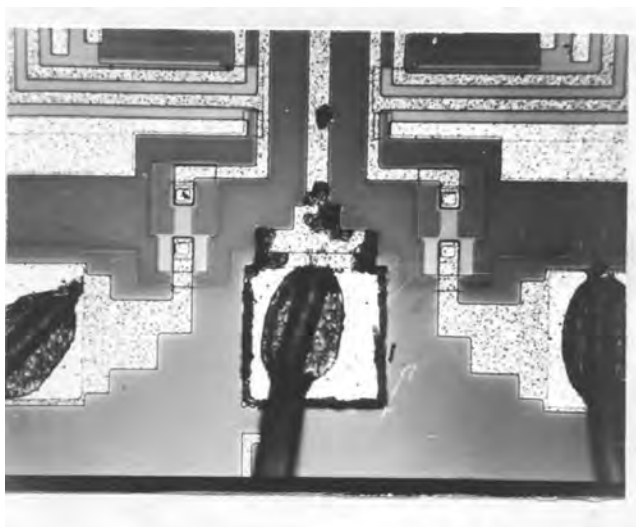
Коррозионные разрушения металлизации в ИС и ПП чаще всего наблюдаются на участках, соединенных с отрицательным полюсом источника питания, поэтому такой вид коррозии называется катодным. Коррозионные разрушения зарождаются на катодных участках металлизации, наиболее близко расположенных к границам анодных участков, т.е. там, где максимальна плотность тока коррозии. В связи с этим наибольшие коррозионные разрушения наблюдаются на краях контактных площадок или шин металлизации, и при обследовании с использованием оптического или растрового микроскопов они выглядят в виде бордюров. Поэтому такой вид коррозии получил название «бордюрный». Следует отметить, что по границе «бордюра», где наблюдаются максимальные разрушения, и происходят разрывы электрических цепей. При этом развитие коррозии замедляется, в противном случае коррозионные разрушения происходили бы на всей поверхности контактных площадок или шин металлизации. Характерный внешний вид коррозионных разрушений, возникающих при катодной («бордюрной») коррозии, приведен на рис. 6.12. Данные фотографии получены с использованием оптического микроскопа после вскрытия ИС. Коррозионные разрушения (темный бордюры вокруг контактных площадок) возникли на площадках, находящихся под отрицательным потенциалом.

При достаточном количестве воды катодная коррозия может происходить в отсутствие агрессивных ионных примесей. Экспериментально установлено, что количества паров воды ~1% достаточно для развития катодной коррозии.

Например, для коррозионного разрыва металлизации шириной 10 мкм и толщиной 1 мкм достаточно, чтобы в реакцию вступило $5,4 \cdot 10^{-11}$ г воды.



Общий вид кристалла



Увеличенное изображение

Рис. 6.12. Характерный внешний вид коррозионных разрушений, возникающих при катодной («бордюрной») коррозии

При герметизации ИС и ПП в атмосфере цеха с относительной влажностью 50% внутри приборов с внутренним объемом $0,1 \text{ см}^3$ (типично для многих типов ИС и ПП) содержится $8,8 \cdot 10^{-7}$ г воды, т.е. в $1,6 \cdot 10^4$ раза больше, чем требуется. Правда, она распределена в подкорпусном объеме приборов и необходимо, чтобы осела на кристалл ИС и ПП для образования электролитически проводящей среды.

Присутствие коррозионно-активных загрязнений ускоряет процесс коррозионного разрушения алюминиевых шин металлизации ИС и ПП. Наиболее агрессивными коррозионно-активными загрязнениями являются ионы галогенов (чаще всего хлора). При разрушении защитной пленки на алюминии (Al_2O_3) металл вступает в реакцию с ионами хлора, образуя хлориды алюминия, которые могут гидролизироваться поверхностной водой до различных гидроксидов алюминия. Этот процесс высвобождает ионы хлора, он вновь взаимодействует с алюминием, являясь катализатором процесса коррозии. На рис. 6.12 приведен характерный внешний вид коррозионных разрушений, возникающих в присутствии коррозионно-активных загрязнений (хлора). Фотография получена с использованием растрового электронного микроскопа.

Факторы, способствующие возникновению и развитию коррозионных отказов

Возникновение и развитие коррозионных отказов ИС и ПП обусловлено следующими факторами:

1) Образование пленки воды на поверхности металлических КТЭ, выступающей в роли электролита. При наличии пленки водного электролита коррозия возможна даже при отсутствии контакта данного КТЭ с разнородным металлом и отсутствии внешнего электрического напряжения (например, за счет образования гальванических пар между разными участками одного КТЭ или микрогальванопар, обусловленных действием примесей в металле, дефектами его структуры и т.д.).

2) Завышенная величина движущей силы коррозии по сравнению с критическим уровнем (ЭДС гальванической пары или напряжение внешнего источника).

3) Наличие коррозионно-активных загрязнений на поверхности КТЭ, некачественные защитные покрытия КТЭ и др.

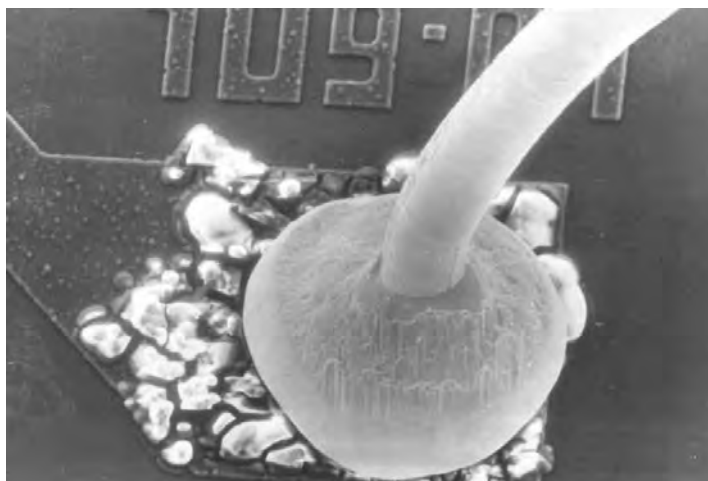
Источниками воды, образующей на поверхности КТЭ ИС и ПП водный электролитический слой, могут быть:

- влага, присутствующая в атмосфере среды герметизации ИС и ПП;
- влага, попадающая в подкорпусной объем ИС и ПП из-за негерметичности корпусов (внешний источник);
- влага, попадающая в подкорпусной объем из внутренних источников.

Влага, присутствующая в атмосфере среды герметизации ИС и ПП, определяется технологическим оборудованием и режимами, в которых осуществлялась герметизация.

К внешним причинам поступления влаги в корпус ИС относятся негерметичные металлокерамические или металлостеклянные спаи деталей корпусов, паянные

припоем или стеклоприпоем, сварные герметизирующие швы (металлостеклянные и металлокерамические корпуса), а также влагопроницаемые полимерные материалы, образующие полый пластмассовый корпус или клеевой герметизирующий шов (керамико- и металлополимерные корпуса) [60].



Внешний вид коррозионных разрушений в области приварки золотого проволочного вывода к контактной площадке



Внешний вид коррозионных разрушений шин металлизации

Рис. 6.13. Характерный внешний вид коррозионных разрушений ИС и ПП в присутствии коррозионно-активных загрязнений

Скорость натекания паров воды в подкорпусной объем при нарушении герметичности определяется параметрами окружающей атмосферы (относительная влажность, температура, давление) и величиной течи.

К внутренним источникам поступления влаги в атмосферу подкорпусного объема ИС и ПП относятся:

- гигроскопичные полимерные материалы, используемые в конструкции приборов для герметизации, посадки кристалла или защиты его поверхности и накапливающие в себе влагу;
- развитая гидрофильная поверхность внутренних стенок монтажного колодца корпуса (шероховатость и микропористость поверхности керамики, стеклоприпоя, вожженной металлизации с гальванопокрытием);
- некоторые марки стеклоприпоев, способные выделять влагу в процессе герметизации ИС и ПП.

Завышенная величина движущей силы коррозии

Величина движущей силы коррозии непосредственно определяет величину тока коррозии и соответственно скорость коррозии. При гальванической коррозии она целиком зависит от конструкции ИС и ПП и используемых в ней материалов. При электролитической коррозии величина движущей силы определяется величиной приложенного внешнего напряжения и конструктивными особенностями приборов, оказывающими влияние на формирование областей с наибольшей напряженностью поля и плотностью тока коррозии.

Наличие коррозионно-активных загрязнений на поверхности КТЭ

Возможными источниками коррозионно-активных загрязнений могут быть некачественные отмывки пластин и деталей корпусов в процессе выполнения технологических операций, а также выделения оператора при сборке ИС и монтаже РЭА (частицы слюны, пота и т.д.). Эти выделения содержат ионы хлора и щелочных металлов и могут существенно ускорять развитие коррозии.

Так, при производстве БИС широко применяется плазмохимическая обработка (ПХО) пластин. Наряду с очевидными преимуществами применения ПХО требует осторожности: после травления в хлорсодержащей плазме алюминиевая металлизация на воздухе начинает быстро корродировать. Использование фторсодержащей плазмы в качестве травителя (травление поликремния, диэлектрических слоев) приводит к загрязнению поверхности ИС соединениями фтора, различными углеводородными остатками с хлором и фтором. Все они обладают высокой коррозионной активностью.

Пониженное качество алюминиевой металлизации и деталей корпусов также может значительно снижать коррозионную стойкость ИС. Для алюминиевой металлизации оно связано с ухудшением структуры металлизации (рыхлая, столбчатая структура, наличие окисленных границ зерен и т.д.) и снижением защитных свойств оксида алюминия, повторяющего структуру металла.

Для корпусов критичными дефектами изготовления, которые в наибольшей степени влияют на их коррозионную стойкость, являются дефекты гальванопокрытия, снижающие его защитные антикоррозионные свойства. Из них наибо-

лее часто наблюдаются низкая адгезия покрытий к металлическим КТЭ корпуса (включая вожженную металлизацию и узлы припайки выводов), малая толщина покрытий и их повышенная пористость. Серьезные предпосылки для зарождения очагов коррозионных поражений создают дефекты, появляющиеся при сборке ИС и РЭС:

- сколы и просечки стекла, обнажающие поверхности металлических деталей корпуса без гальванических покрытий;
- механические повреждения крышек и выводов (царапины, вмятины, трещины).

*Влияние электрических режимов и условий эксплуатации
на возникновение и развитие коррозии*

Для алюминиевой металлизации ИС и ПП влияние электрических режимов и условий эксплуатации на развитие коррозионных отказов обусловлено их воздействием на степень увлажнения поверхности кристалла, а также на величину движущей силы коррозии.

В ИС и ПП со свободным внутренним объемом масса воды внутри корпуса для герметичных приборов является постоянной величиной. При этом часть воды находится (при комнатной температуре) в паровой фазе, а часть адсорбирована на поверхности кристалла и внутренних поверхностях корпуса (а также адсорбирована в полимерных материалах, стеклоприпое). С повышением температуры окружающей среды все большая часть адсорбированной воды переходит в паровую фазу и перестает принимать участие в процессах коррозии. В связи с этим эксплуатация ИС и ПП при повышенных температурах окружающей среды, как правило, снижает вероятность коррозионных отказов. Напротив, охлаждение ИС и ПП до точки росы и ниже создает благоприятные условия для развития коррозии.

Многочисленное термоциклирование с переходом через точку росы усиливает развитие коррозии в связи с усилением адсорбции на участках, где она уже имела место. Кроме того, оно способствует развитию дефектов герметизации, если они имели место, и усилению натекания паров воды.

Вместе с тем эксплуатация или испытания ИС при повышенных температурах окружающей среды не предотвращают полностью коррозию металлизации ИС, если на деталях ее корпуса в условиях производства было адсорбировано значительное количество воды и не было принято необходимых мер по ее удалению перед герметизацией корпуса.

Влияние электрического режима на степень увлажнения поверхности кристалла зависит от температуры кристалла относительно корпуса, которая определяется мощностью тепловыделения в кристалле и тепловым сопротивлением кристалл – корпус. При повышении температуры перегрева адсорбция паров воды происходит преимущественно на более холодных поверхностях деталей корпуса и в меньшей степени на поверхности кристалла. В связи с этим коррозия металлизации ИС и ПП с мощностью рассеяния 50 мВт и более встречается редко, в то время как в маломощных приборах она имеет место значительно

чаще. Для КМОП ИС, у которых температура перегрева кристалла относительно корпуса во многих режимах применения менее 1°C, катодная коррозия может являться основным видом отказов.

Увеличение напряжения питания и амплитуды униполярного импульсного сигнала при постоянном уровне увлажнения поверхности кристалла приводит к росту тока коррозии в пленке адсорбированной воды и соответственно увеличению скорости коррозии. При этом возрастет температура кристалла и, как указано выше, уменьшается уровень увлажнения его поверхности, и, соответственно, скорость коррозии должна снижаться. Такой же эффект достигается при увеличении частоты сигнала.

В связи с этим воздействие электрического режима на скорость развития коррозии является неоднозначным. Более опасен статический и ждущий режим, при котором мощность рассеяния минимальна, а постоянная составляющая сигнала максимальна. Этот режим благоприятен для развития электролитической коррозии как металлизации кристалла, так и выводов керамических корпусов.

Влияние условий эксплуатации на развитие коррозионных отказов связано прежде всего с температурно-влажностными условиями и возможностью доступа к ИС и ПП коррозионно-активных агентов: компонентов промышленной атмосферы (сернистого газа, сероводорода, аммиака, окислов азота, озона), а также растворителей, флюсов, компаундов, лаков, используемых при изготовлении РЭА и содержащих коррозионно-активные составляющие.

Наиболее жесткими климатическими условиями, способствующими коррозии, являются тропические, для которых характерно сочетание высокой влажности и повышенной температуры. Эти условия благоприятны для развития микроорганизмов. Такие условия не характерны для аппаратуры автоматических КА систем спутниковой связи.

В условиях умеренно холодного климата развитию коррозии способствуют охлаждение ИС до температуры ниже точки росы подкорпусной атмосферы (для металлизации) или окружающей атмосферы (для деталей корпуса).

Влияние сборочных операций при изготовлении РЭС на развитие коррозии ИС и ПП

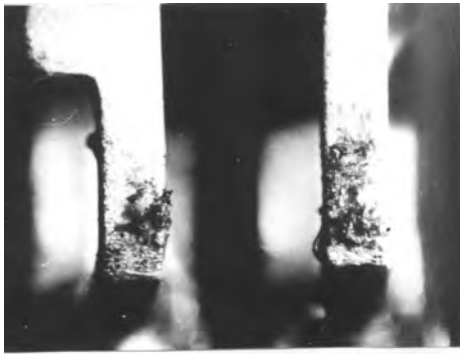
При сборке РЭС ИС подвергаются кратковременным, но значительным механическим, температурным и химическим воздействиям, которые при нарушении норм, установленных в нормативной документации, могут существенно ослабить их коррозионную стойкость и при жестких условиях эксплуатации стать основной причиной развития коррозии.

К числу сборочно-монтажных операций, способных оказать заметное влияние на стойкость ИС к коррозии, относятся операции формовки и облуживания выводов, монтажа и пайки ИС на печатные платы, очистки плат после монтажа ИС и нанесения на них защитного лакового покрытия. Некачественное выполнение этих операций может сопровождаться образованием локальных механических дефектов и повреждений корпусов, включающих:

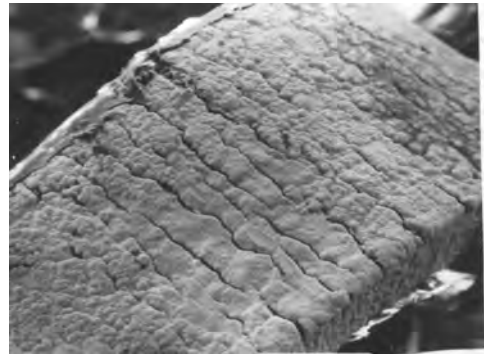
- растрескивание и отслоение гальванического покрытия в местах формовочных перегибов из-за малого радиуса гибки;
- сколы стекла или керамики, частичный отрыв вывода от контактной площадки (металлокерамические корпуса) из-за превышения допустимых растягивающих и отрывающих нагрузок в местах присоединения выводов к корпусу;
- следы от инструмента в виде царапин, вмятин и загрязнений на выводах (реже на крышке) из-за использования пинцетов без фторопластовых наконечников, низкого качества рабочих поверхностей инструментов и приспособлений для рихтовки, формовки выводов.

Указанные дефекты чаще всего становятся очагами коррозионных поражений КТЭ корпусов при эксплуатации ИС в условиях повышенной влажности окружающей среды. В наиболее критичных случаях некачественного выполнения формовки выводов, сопровождающихся нарушением герметичности корпуса, такого рода дефекты провоцируют развитие коррозии на кристалле из-за попадания в подкорпусной объем ИС влаги и коррозионно-активных компонентов окружающей среды.

На рис. 6.14 приведены вид коррозионных разрушений внешних выводов ИС вследствие гальванической щелевой коррозии из-за растрескивания золотого защитного покрытия выводов и увеличенное изображение внешнего вывода ИС с растрескиванием в месте формовочного изгиба.



Вид коррозионных разрушений внешних выводов ИС вследствие гальванической щелевой коррозии



Увеличенное изображение внешнего вывода ИС с растрескиванием в месте формовочного изгиба

Рис. 6.14. Вид коррозионных разрушений внешних выводов ИС вследствие гальванической щелевой коррозии из-за растрескивания золотого защитного покрытия выводов

Монтаж и пайка ИС на печатных платах при нарушении технологии их выполнения могут приводить к образованию дефектов, вызванных механическими или тепловыми воздействиями, аналогичных по внешнему виду указанным выше, либо дефектов коррозионного характера из-за применения для приклейки ИС клеевых материалов с высоким содержанием коррозионно-активных элементов.

Для очистки печатных плат после монтажа и пайки от остатков флюса и других загрязнений следует применять, как правило, спирт или смеси на его основе (с бензином или фреоном). Промывка плат водой (деионизованной или дистиллированной) приводит к заполнению влагой различных поверхностных микрорельефов (пор, щелей), частичному поглощению ее клеевыми материалами, создавая условия для возможного развития коррозионных процессов на корпусах ИС.

Наносимое на платы ИС для защиты от коррозии лаковое покрытие способно оказывать прямо противоположное влияние на их коррозионную стойкость, если технология его нанесения недостаточно отработана и приводит к таким дефектам, как заниженная его толщина (менее 3,5 мкм), особенно на острых кромках металлических деталей корпусов, растрескивание и отслоение лака при термообработке и на испытаниях РЭА.

Факторами, снижающими защитные свойства лакового покрытия, являются неполная его полимеризация и низкая адгезия к материалам платы и корпусов ИС, использование лака после истечения срока его жизнестойкости, отсутствие контроля за содержанием в нем агрессивных свободных ионов и количеством нанесенных слоев лака (рекомендуется трехслойное нанесение лака).

Анализ коррозионных отказов

Анализ коррозионных отказов производится в соответствии с общим алгоритмом проведения анализа отказов ЭРИ. При этом следует иметь в виду определенные особенности, которые необходимо учитывать при проведении анализа для достоверного установления причины отказа.

При анализе сопроводительной документации необходимо обращать внимание на условия возникновения отказа и наличие факторов, способствующих возникновению и развитию коррозии (нахождение в атмосфере с повышенной влажностью и агрессивными средами, эксплуатация в переменном температурно-влажностном режиме с переходом через температуру точки росы, особенно в электрическом режиме, и др.).

Важным признаком наличия коррозионных разрушений в приборах являются дефекты внешнего вида корпуса (бурые и темные пятна, сколы, трещины на выводах и др.).

Проверка внешнего вида является определяющим этапом при анализе отказов из-за коррозии корпуса. Применение метода оптической микроскопии в этом случае является наиболее результативным – с его помощью может быть получена исчерпывающая информация о признаках отказа. Особое внимание при этом необходимо уделить обследованию поверхности металлических КТЭ, а также поверхности изолирующего материала (керамики, стекла) между выводами, между выводами и крышкой и/или дном основания.

В случае отказов ИС из-за коррозии КТЭ в подкорпусном объеме проверка внешнего вида методом оптической микроскопии также является чрезвычайно полезной. В этом случае необходимо обращать особое внимание на целостность

и качество шва герметизации, наличие трещин и сколов в керамике корпуса, стеклоизоляторах. На этом этапе приблизительно определяется возможность попадания в подкорпусной объем ИС паров воды и агрессивных веществ.

Важным этапом в получении информации о признаках коррозионного отказа ИС и ПП является контроль статических и динамических параметров. При этом может быть получена информация не только о самом факте отказа, но и о предположительном участке (участках) электрической принципиальной схемы, ответственном за отказ. В результате проведения измерения электрических параметров должно быть получено представление о характере и месте отказа. Для подтверждения коррозионного отказа в отдельных случаях необходимы измерение динамических электрических параметров и контроль функционирования приборов. Для ИС, реализующих запоминающие и другие сложные устройства, таким образом можно подтвердить коррозионный отказ отдельной ячейки памяти или локализовать зону отказа.

Контроль герметичности является принципиально необходимой операцией анализа, если по предварительным данным есть основания полагать, что имеет место коррозионный отказ. Если прибор негерметичен, необходимо выяснить, связано ли это с некачественной герметизацией или с недопустимыми механическими и (или) тепловыми воздействиями на ИС и ПП. Это обстоятельство следует учитывать при демонтаже отказавших ЭРИ из аппаратуры.

При контроле герметичности следует иметь в виду, что большинство ИС и ПП в процессе изготовления РЭА при монтаже на печатные платы покрываются защитным слоем лака (УР-231 и ему подобными), что может привести к закупорке части средних и особенно малых течей в негерметичных корпусах. Поэтому перед проведением проверки лак рекомендуется удалить методом химического или плазмохимического травления, что способствует восстановлению части закупоренных ранее течей. Однако и в этом случае нельзя гарантировать, что течи восстановятся. В то же время существует опасность проникновения травителей в подкорпусной объем негерметичных ИС, что может сделать невозможным дальнейший физико-технический анализ продуктов коррозии.

Проверка герметичности при анализе коррозионных отказов должна проводиться преимущественно безжидкостными методами. Применяемые методы проверки должны в совокупности перекрыть весь диапазон течей (большие, средние, малые).

В случае несоответствия ИС требованиям по герметичности необходимо локализовать течь. Для этого можно использовать пузырьковый метод – окунание предварительно опресованного гелием или элегазом прибора в жидкость (этиленгликоль).

Важной и принципиально необходимой операцией анализа является контроль содержания влаги в подкорпусном объеме отказавших приборов. При анализе отказавших ИС и ПП используется разрушающий метод контроля с помощью масс-спектрометра, позволяющий определять содержание воды, наиболее полно и одновременно контролировать концентрацию в подкорпусном объ-

еме других газов. Количество паров воды в подкорпусном объеме, определяемое масс-спектрометрическим методом при температуре 100°C, характеризует общее (полное) количество влаги внутри корпуса, которая при комнатной температуре находится в адсорбированном состоянии (большая часть) и в виде пара. Норма на содержание влаги в подкорпусном объеме при температуре 100°C установлена не более 0,5% величины объема (3,7 г/м³, или 5 000 ppm). При контроле содержания паров воды при температуре 20°C датчиками влажности установлена норма – не более 0,05% от объема корпуса (500 ppm), что соответствует температуре точки росы минус 27°C.

При вскрытии корпуса отказавших ИС и ПП предпочтение отдается способам вскрытия без нагрева или других воздействий, способных повлиять на состав загрязнений внутри корпуса и продуктов коррозии.

Визуальное обследование вскрытых ИС и ПП производится вначале с использованием оптических микроскопов с кратностью увеличения 16, 25 или 32 при косонаправленном освещении объекта. Обследуются: контактные площадки на кристалле, траверсы (выводы корпуса), проволочные соединения (внутренние выводы), а также состояния внутренних поверхностей корпуса. На последующих этапах обследования применяют микроскопы с кратностью увеличения 50 и выше с прямым освещением объекта. Полезно использовать при обследовании режимы темного и светлого полей, поляризованный свет, фазовый контраст.

Применение растрового электронного микроскопа позволяет исследовать морфологию продуктов коррозии даже в случае точечных коррозионных разрушений, встречающихся в БИС и СБИС.

Элементный и химический анализ продуктов коррозии также является принципиально необходимой операцией анализа. Его результаты необходимы для установления окончательного механизма и истинных причин отказа, а также выработки обоснованных корректирующих действий.

Контрольные вопросы

1. Опишите место работ по исследованию физических причин отказов в системе управления надежностью технических объектов.

2. Опишите рациональную структуру информации об отказах технических объектов.

3. Объясните основные операции алгоритма анализа причин отказов РЭС.

4. Объясните основные операции алгоритма анализа причин отказов ЭРИ.

5. Дайте характеристику отказов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, связанных с утечками, пробоями и пережогами, виды и механизмы отказов, методы анализа и предотвращения отказов.

6. Дайте характеристику коррозионных отказов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, видов и механизмов отказов, методов анализа и предотвращения отказов.

Часть 2

МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ КА

Глава 7. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ

7.1. Введение

Действующие на отечественных предприятиях системы управления надежностью создавались на основе и в соответствии с нормативно-техническими документами (ГОСТы, ОСТы, Положения), которые нацелены на обеспечение максимум 7–8 лет эксплуатации автоматических КА. В соответствии с действующими документами в качестве основных процессов в системе управления надежностью рассматривались процессы задания и контроля требований к надежности. Рассогласование между фактическим и требуемым состоянием объекта управления (между достигнутым и требуемым уровнем надежности) служило основой для выработки управленческих решений и принятия корректирующих действий. Источниками информации о рассогласовании служили данные о результатах испытаний и эксплуатации объектов. В связи с этим методология предполагала создание исследовательских, отработочных и опытных образцов изделий для их испытаний, отработки и корректировки КД и ТД (включая ЛИ) и затем изготовление лётных объектов для эксплуатации.

Естественно, что такая методология не соответствует сегодняшнему уровню развития космической техники, единичному характеру создания космических объектов и экономическим ограничениям, не позволяющим использовать для исследований и отработки объектов установленного в действующих документах количества исследовательских и отработочных образцов. В настоящее время практически каждый создаваемый КА связи является уникальным изделием, которое проходит этапы проектирования, конструирования, изготовления и наземных испытаний, а затем выводится на рабочую орбиту и после ЛИ сдается в штатную эксплуатацию.

Недостатками действующей методологии, закреплённой нормативно-методическими документами, разработанными в период 1975–1998 гг., являлись также преимущественное использование статистических подходов к управлению качеством и надежностью изделий и концентрация усилий на приемочном контроле изделий в ущерб соответственно физическим подходам и управлению процессами обеспечения качества на этапах создания изделий.

Соответствие современному состоянию развития промышленной космонавтики достигается в описываемой далее системе управления надежностью, принятой в ОАО «Газпром космические системы», на основе следующих фундаментальных подходов и положений [64, 65]:

1. Целью управления является создание КА, отвечающих требованиям конкурентоспособности по функциональным характеристикам («характеристикам назначения») и надежности. Цель управления достигается путем предотвращения проблем надежности на всех этапах и всех уровнях иерархии создания и эксплуатации объектов на основе получения и использования информации о характеристиках объектов, получаемой последовательно на этапах проектирования, разработки, изготовления и испытаний комплектующих элементов, затем – узлов, блоков, приборов, аппаратуры (оборудования), бортовых систем и, наконец, КА в целом.

2. основополагающее положение методологии состоит в использовании физического подхода для анализа и управления надежностью. В соответствии с этим в отличие от понимания *отказа* объекта или изделия как *случайного явления* (события) в методологии компании отказ рассматривается как *прямое следствие конкретного недостатка* разработки, изготовления или эксплуатации изделия, который не был своевременно выявлен и устранен. Следствием этого положения являются устанавливаемая система требований к указанным процессам и методам их контроля, а также система личной ответственности исполнителей за качество выполняемых работ (в пределах регламентированных зон ответственности).

3. При определении состава и содержания задач управления надежностью учитываются следующие особенности свойств и процессов обеспечения надежности:

– «неоперационность» показателей надежности, состоящая в невозможности путем прямых измерений оценить (проконтролировать) количественные значения ПН (безотказности и долговечности) у разработанного и изготовленного объекта. Эта особенность определяет необходимость проведения работ по поэтапному обеспечению надежности объекта, выявлению предпосылок к снижению надежности, их постоянному мониторингу в процессе разработки и изготовления и принятию превентивных мер по исключению возникающих и прогнозируемых технических рисков;

– требование «скоординированности работ по надежности с этапами создания технических объектов». В соответствии с данным требованием реализуемые в системе процедуры по обеспечению надежности и проводимое на их основе совершенствование характеристик объектов должны быть согласованы с основным содержанием этапов создания объектов. Данное положение требует строгого соблюдения установленных этапов проведения работ по проектированию, конструированию, квалификации, изготовлению и приемке объектов;

– принцип «исчерпывающего поэлементного подхода», требующий учета и контроля максимально полного множества факторов и элементов, влияющих на надежность создаваемого объекта. При этом под элементами, подлежащими контролю, понимаются элементы функционального, схемотехнического, кон-

структивно-технологического базиса объектов, технологические процессы их создания и даже процессы организации работ. Данный принцип определяет необходимость выявления «критичных» элементов и видов работ, к которым наиболее чувствителен создаваемый объект (в том числе выявления «точек единичного отказа»), и принятия особых мер по их контролю.

4. Конкретные задачи контроля работ применительно к созданию бортового оборудования КА, вытекающие из перечисленных методических подходов и положений, следующие:

на этапе проектирования:

– проверка полноты и согласованности требований и заданий, выданных участникам проекта, анализ эффективности принятых структурно-функциональных и схемно-конструктивных решений в части обеспечения заданных в ТЗ функциональных и основных эксплуатационных характеристик (выполняется методами расчета и анализа, а также экспериментальными методами с использованием лабораторных образцов и макетов при эскизном проектировании и в процессе лабораторно-отрабочных испытаний);

на этапе разработки рабочей конструкторской документации:

– проверка соответствия принятых конструктивно-технологических решений проектной документации и оценка их эффективности в части обеспечения функционирования в предельных режимах и условиях эксплуатации, наличия запасов работоспособности и требуемого ресурса (выполняется методами расчета и преимущественно экспериментальными методами на отработочных комплектах изделий, полностью идентичных штатным образцам на конструкторско-доводочных, граничных и ресурсных испытаниях);

на этапе изготовления и приемки лётных изделий (Ли):

– проверка качества изготовления изделий в части отсутствия скрытых производственных дефектов, влияющих на функциональные и эксплуатационные характеристики (выполняются комплексом работ по анализу и контролю процессов изготовления составных частей и экспериментальными методами на приемосдаточных испытаниях лётных комплектов оборудования).

на этапе эксплуатации изделий:

– анализ возникающих проблем и разработка мер по их предотвращению в новых проектах.

5. Основными этапами работ по созданию КА, на которых реализуется методология управления надежностью, являются этапы:

- формирования контрактных документов;
- выпуска эскизного проекта;
- наземной экспериментальной отработки;
- выпуска конструкторской документации;
- обеспечения бортовой аппаратуры высоконадежной электронной компонентной базой;
- изготовления штатных изделий;
- сборки и испытаний КА.

6. Техническая сущность разработанной на основе физических подходов к управлению надежностью КА методологии сводится к последовательному решению трех задач:

– задание обоснованных и взаимоувязанных требований по характеристикам назначения и надежности КА и составных частей на всех иерархических уровнях (от КА к бортовым системам, оборудованию, ЭРИ и материалам);

– проверка соответствия (квалификации) принимаемых проектных, конструкторских и технологических решений заданным требованиям (исключение схемно-конструктивных дефектов, способных стать причиной преждевременного износа, деградации характеристик и отказов);

– контроль качества изготовления составных частей, сборки и испытаний КА (исключение производственных дефектов, влияющих на долговечность).

7. Методология охватывает 4 уровня объектов управления (рис. 7.1). Первый уровень включает электрорадиоизделия (микросхемы, транзисторы, диоды, реле и другие элементы) и материалы. Из этих элементов формируется второй уровень – оборудование. Третий уровень – бортовые системы. В современных спутниках в этот уровень также входит математическое обеспечение, которое управляет взаимодействием этого оборудования, выполняя функцию системы. Четвертый уровень – собственно сам космический аппарат.

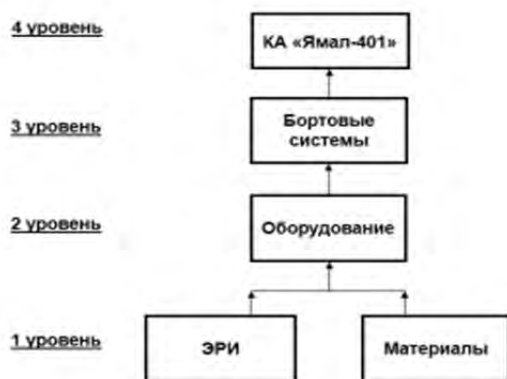


Рис. 7.1. Уровни объектов управления надежностью КА

7.2. Принципы организации взаимодействия заказчика и исполнителей проекта

Управление надежностью КА начинается с организации эффективного взаимодействия заказчика и исполнителей проекта, основа которого закладывается при разработке документов контракта на создание КА, таких как:

- «Техническое задание (или спецификация) на КА»;
- «Требования по квалификации и приемке КА»;
- «Программа обеспечения качества»;
- «Содержание работ».

Перечисленные контрактные документы должны содержать систему взаимосогласованных требований по ресурсу и безотказности, методам их обеспечения и подтверждения для КА, составных частей и комплектующих. В том числе:

- количественные и качественные требования к надежности КА, систем, оборудования и ЭРИ (в ТЗ или спецификации на КА);
- требования к объему, составу, методам и нормам испытаний для подтверждения квалификации и контроля качества изготовления ЭРИ, оборудования, систем и КА (в «Требованиях по квалификации и приемке КА»);
- требования к объему и содержанию технических мероприятий, которые должен выполнить генеральный подрядчик и подрядчики на этапах создания КА, их составных частей и Ки для обеспечения надежности и качества (в «Программе обеспечения качества»);
- требования к организации работ, порядку их выполнения и этапам контроля, составу и содержанию отчетных документов (в «Содержании работ»).

Документ «Требования по квалификации и приемке КА» устанавливает порядок, объемы работ и методы подтверждения соответствия разрабатываемых объектов требованиям по выполняемым функциям и надежности. Требованиями документа охватываются все этапы создания объектов и все уровни разукрупнения (от ЭРИ и материалов до оборудования, систем, КА и КК в целом).

Для обеспечения выполнения требований данного документа и контроля за ходом работ введен новый для отечественной практики организационно-методический документ – *паспорт квалификации*, разрабатываемый и заполняемый для оборудования и систем КА. Паспорт квалификации содержит полную программу работ с рассматриваемым объектом (каждым образцом бортового оборудования КА и каждой функциональной системой КА) на этапах формирования требований, их проектирования и конструирования, изготовления, испытаний и приемки. Паспорт квалификации содержит также данные о поставщике оборудования, ответственных лицах (исполнителях и кураторах), о схемном и конструктивно-технологическом исполнении и их особенностях. Заполнение паспорта квалификации проводится ответственным лицом заказчика последовательно по мере выполнения и приемки работ, документов, материальной части с приложением доказательных документов, подтверждающих полноту выполнения требований контракта и (или) выявленные проблемные вопросы. Отработанный по всем критериям паспорт квалификации подвергается рассмотрению с участием специалистов, занимающихся эксплуатацией КА, и сдается им для непосредственного использования как важный источник информации об объекте, его «генетических» характеристиках и особенностях.

На основе анализа и интеграции результатов работ, отражаемых в паспортах квалификации оборудования и бортовых систем, формируется *матрица вери-*

фикации контрактных требований, наглядно отражающая поэтапно состояние и результаты создания и отработки КА и его составных частей, соответствие проведенных работ и их результатов требованиям контракта, содержащимся в документе «Требования по квалификации и приемке».

В «Программе обеспечения качества» определяется система управления качеством продукции, которая обеспечивается генеральным подрядчиком с использованием имеющихся в его распоряжении организационно-технических и нормативно-методических средств и средств подрядчиков. Документ учитывает требования международных стандартов системы ИСО 9000 и решает вопросы управления разработкой и проектированием, документацией, критичными элементами (вопросами). Документ детализирует требования к глубине и объему выполняемых анализов при проектировании продукции, отработанности процессов изготовления и испытаний, управления несоответствиями для всех иерархических уровней составных частей и комплектующих и продукции в целом.

Каждое требование в перечисленных документах поддерживается выпуском распорядительных документов в подразделениях заказчика, регламентирующих процесс контроля их выполнения (с установлением этапа контроля, формы отчета по выполнению требования, ответственного лица – из числа руководителей и специалистов компании).

Контрактный документ «Содержание работ» относится к документам по управлению проектом. В нем устанавливается строгая этапность выполнения работ по проекту. Документ организует и детализирует взаимодействие генерального подрядчика и заказчика на этапах создания объекта (эскизный проект, выпуск конструкторской документации, изготовление, сборка и испытания КА, интеграция со средствами выведения и наземным комплексом управления, летные испытания (ЛИ), сдача на орбите, сопровождение эксплуатации объектов), определяет порядок сдачи и приемки выполненных работ и продукции, состав отчетных документов.

На основе данного документа разрабатывается *матрица контроля работ*, которая содержит данные о полной номенклатуре составных частей КА, ответственных за их создание и контроль качества со стороны заказчика и исполнителей.

С целью создания реальных условий для активного участия заказчика в процессах создания КА в компании разработана система информационного обеспечения, имеющая два существенно отличных по содержанию контура управления (рис. 7.2).

В первом контуре управления осуществляются работы, обеспечивающие получение знаний и данных, их обобщение, структуризацию и стандартизацию в виде положений, регламентов или стандартов. Источниками информации являются результаты разработки, испытаний и эксплуатации КА орбитальной группировки «Ямал», их составных частей, оборудования и Ки, а также «литературные источники» с релевантной информацией.

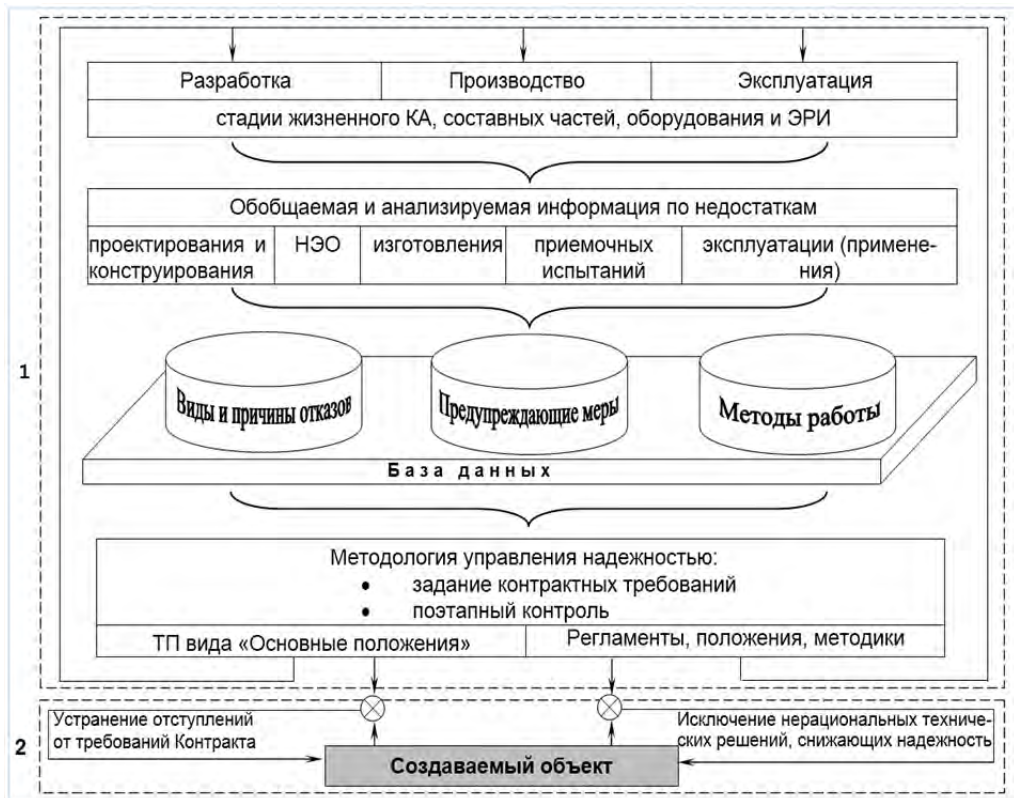


Рис. 7.2. Система информационного обеспечения заказчика

Во втором контуре указанная информация используется для принятия конкретных решений на этапах выполнения проектов по созданию КА.

Непосредственное взаимодействие заказчика и исполнителей в ходе выполнения проектов организуется с помощью специальных процедур, называемых рассмотрениями. Данные процедуры определены в европейских стандартах (например, в стандарте ECSS P-001B «Глоссарий терминов») следующим образом: «Рассмотрение – мера, предпринимаяемая для определения пригодности, адекватности и результативности предмета обсуждения для достижения поставленных целей».

Уточняя данное определение, в методологии компании под процедурой рассмотрения понимается форма контроля заказчиком полноты реализации требований контракта по надежности создаваемых КА, имеющая следующие существенные признаки:

– перечень и программы рассмотрений, планируемых к выполнению на этапах проектов, устанавливаются в контрактных документах, графики рассмотрений увязываются с графиками выполнения проекта;

– до начала рассмотрения исполнитель, ответственный за его организацию, представляет заказчику материалы, содержащие соответствующие виду рассмотрений результаты работ и характеристику ожидаемых или возможных проблем и предложения по путям и методам их решения;

– в рассмотрении участвуют специалисты заказчика, исполнителей и (при необходимости) экспертных организаций;

– выполнение решений по результатам рассмотрения является условием для продолжения работ по проекту.

Каждое рассмотрение представляет собой аудит проекта по конкретным вопросам, обеспечивающий поддержку проекта на важных этапах выполнения и придающий уверенность в правильности принимаемых решений и успешности работ по выполнению требований контракта.

На рис. 7.3 показаны этапы выполнения проектов создания КА (в соответствии с действующими отечественными нормативными документами [7, 8] и используемые заказчиком виды рассмотрений из комплекса, предусмотренного стандартами ECSS.

7.3. Организация процедур рассмотрений

Рассмотрения планируются в рамках общего управления проектом, график проведения рассмотрений должен соответствовать этапам работ, определённых контрактом.

В сквозных (на весь проект в целом) и локальных (на отдельные этапы проекта) планах управления проектом, формируемых с учетом специфики создаваемых КА, опыта компаний, участвующих в проекте, других конкретных условий работы, должны уточняться состав и задачи работ на этапах проекта и определяться соответствующие им перечни видов рассмотрений.

Рассмотрения бывают «внутренние» и «внешние». Внутренние рассмотрения проводятся комиссией, формируемой из специалистов организации, по работам или продукции которой проводится рассмотрение, или с участием привлекаемых организацией экспертов из внешних организаций. Внешние рассмотрения проводятся с участием заказчика контракта и с участием экспертов из специализированных организаций, привлекаемых заказчиком при необходимости.

Генеральный подрядчик отвечает за все вопросы, связанные с организацией рассмотрения вплоть до его окончания, включая планирование и организацию рассмотрения, распределение и контроль выполнения поручений, выпуск протокола по результатам рассмотрения и материалов, подтверждающих реализацию поручений.

По согласованию с заказчиком и генеральным подрядчиком отдельные рассмотрения могут организовывать участвующие в проекте подрядчики – разработчики и изготовители составных частей (СЧ) КА, систем и оборудования.

При организации рассмотрений должны обеспечиваться необходимые условия для тщательной и полной оценки документации и материальной части и для более раннего обнаружения возможных и действительных проблем, которые могут оказать нежелательное воздействие на характеристики создаваемых КА.

С этой целью до начала каждого рассмотрения генеральный подрядчик (подрядчик, организующий рассмотрение) представляет заказчику пакет документов, включающий:

- результаты выполненных анализов, данные по испытаниям и другие результаты, соответствующие уровню проработки проекта, полностью освещающие рассматриваемый вопрос и подтверждающие достигнутый прогресс;

- характеристику ожидаемых или возможных проблем и предложений по путям и методам их решения.

Каждое рассмотрение должно включать также анализ хода выполнения поручений предшествующих рассмотрений и выводы о состоянии и необходимых мерах по устранению недостатков в выполнении поручений.

Конкретный срок представления заказчику перечисленных документов до даты начала рассмотрения устанавливается в контракте. Как правило, срок представления заказчику документов должен составлять не менее 15 рабочих дней.

После оценки документов заказчик не позднее чем за 5–7 календарных дней до рассмотрения может выслать в адрес генерального подрядчика замечания, комментарии и дополнительные вопросы по представленному комплекту документов.

Генеральный подрядчик должен дать ответ на эти замечания, комментарии и дополнительные вопросы во время рассмотрения.

За 10 рабочих дней до рассмотрения генеральным подрядчиком должно быть выслано заказчику уведомление о проведении рассмотрения, содержащее следующую информацию:

- цель и предмет рассмотрения;
- дата, время встреч по рассмотрению;
- повестка рассмотрения;
- состав комиссии по рассмотрению со стороны генерального подрядчика.

На основе полученного уведомления заказчик формирует состав участников рассмотрения от подразделений Головного конструкторского бюро (ГКБ) ОАО «ГКС». При необходимости в состав участников конкретного рассмотрения могут быть включены специалисты других подразделений ОАО «ГКС» или специалисты внешних экспертных организаций.

Состав группы участников рассмотрений от заказчика и руководитель группы утверждаются Генеральным конструктором, руководителем ГКБ по представлению первого заместителя Генерального конструктора, первого заместителя ГКБ. Предложения по составу группы формирует дирекция ГКБ, ответственная за организацию и выполнение проекта.

По результатам проведенного рассмотрения должен быть выпущен протокол. Выявленные в ходе рассмотрения недостатки работ по проекту заносятся в протокол с указанием поручений по их устранению, ответственных за вы-

полнение поручений и сроков выполнения. Поручениям может быть присвоен статус блокирующих, выполнение которых является обязательным для закрытия (завершения) соответствующего этапа работ и разрешения дальнейших работ по проекту.

Протокол подписывается представителями участвовавших в рассмотрении сторон (заказчика, генерального подрядчика, подрядчиков, экспертных организаций и др.) и утверждается руководителями групп участников рассмотрения от заказчика и генерального подрядчика (подрядчика).

Рассмотрение считается успешно завершённым после того, как генеральный подрядчик (подрядчик) выполнит все поручения, предусмотренные протоколом, а заказчик примет их выполнение.

При несогласии членов групп от генерального подрядчика (подрядчика) с носимыми в протокол результатами и (или) выданными им поручениями разногласия могут быть устранены путем обращения уполномоченного должностного лица генерального подрядчика к уполномоченному должностному лицу заказчика. Решение по разногласиям принимаются на основе положений контракта.

Допускается проводить рассмотрения в несколько этапов. При этом должно быть учтено реальное состояние документации, результатов изготовления и испытаний материальной части для своевременного устранения выявленных отклонений от требований и обеспечения минимального влияния на сроки выполнения работ, установленные контрактом.

В табл. 7.1 приведен перечень видов рассмотрений, выполняемых на этапах создания КА. В табл. 7.1 в столбце «Вид рассмотрения» приведены аббревиатуры, соответствующие видам рассмотрений, установленных стандартами системы ECSS и получивших применение в практике ОАО «ГКС» и других предприятий – участников работ по проектам создания КА типа «Ямал».

Таблица 7.1

Перечень видов рассмотрений

Этап проекта	Вид рассмотрения
1. Выпуск эскизного проекта	Установочная встреча или рассмотрение системных требований (SRR – System Requirements Review)
	Рассмотрение состояния квалификации оборудования (EQSR – Equipment Qualification Status Review) и бортовых систем
	Рассмотрение эскизного проекта или предварительное рассмотрение проекта (PDR – Preliminary Design Review)
2. Наземная экспериментальная отработка (НЭО)	Рассмотрение результатов НЭО: – оборудования; – бортовых систем; – составных частей КА
3. Выпуск конструкторской документации	Критическое рассмотрение проекта (CDR – Critical Design Review), включающее: – рассмотрение конструкторской («чертежной») документации; – рассмотрение программно-методической документации; – рассмотрение эксплуатационной документации

Этап проекта	Вид рассмотрения
4. Изготовление бортового оборудования	Рассмотрение готовности ИТЦ к испытаниям комплектующих ЭРИ
	Рассмотрение результатов испытаний комплектующих ЭРИ в ИТЦ
	Рассмотрение готовности к изготовлению лётного оборудования (MRR – Manufacturing Readiness Review)
	Рассмотрение качества изготовления в точке контроля обязательной (MIP – Mandatory Inspection Point)
	Рассмотрение готовности к испытаниям (TRR – Test Readiness Review)
	Рассмотрение результатов приемочных испытаний (TRB – Test Review Board)
	Рассмотрение готовности к поставке (DRB – Delivery Review Board)
5. Сборка и испытания КА	Рассмотрение готовности к изготовлению КА, включая составные части КА (платформа и модуль Пн)
	Последовательное рассмотрение результатов сборки: платформы; модуля Пн; космического аппарата
	Последовательное рассмотрение готовности к испытаниям: платформы; Пн; космического аппарата
	Последовательные рассмотрения готовности к каждому виду приемочных испытаний КА и их результатов
	Рассмотрение результатов приемочных испытаний КА
	Рассмотрение завершения изготовления (FMCR – Flight Model Completion Review) и приемка КА на заводе-изготовителе (CRR – Commissioning Result Review)
6. Запуск КА и лётные испытания	Рассмотрение готовности к запуску (LRR – Launch Readiness Review)
	Рассмотрение готовности к интеграции со средствами выведения (FRR – Flight Readiness Review)
	Рассмотрение результатов ЛИ или заключительная приемка КА (FQR – Flight Qualification Review)

В следующей главе описаны конкретные цели, программы и содержание работ, выполняемых в процессе рассмотрений, иллюстрируемые отдельными примерами их результативности применительно к проектам создания КА типа «Ямал».

Следует отметить, что в настоящем издании не ставится задача полного и исчерпывающего раскрытия объемов и содержания всех видов рассмотрений, а акцентируется внимание на тех аспектах, которые, во-первых, не нашли достаточного отражения в отечественной нормативно-методической документации и, во-вторых, в реализации которых в ходе выполнения проектов возникают наибольшие трудности.

Контрольные вопросы

1. Опишите цель управления надежностью КА согласно методологии ОАО «Газпром космические системы» и используемые средства ее достижения.
2. Изложите суть используемого физического подхода к управлению надежностью, основные следствия из него.
3. Назовите учитываемые методологией особенности свойств надежности по сравнению с другими характеристиками технических объектов.
4. Назовите основные этапы работ по созданию КА, на которых реализуется методология, и решаемые на этих этапах задачи.
5. Объясните, почему методология управления надежностью должна охватывать все 4 уровня разукрупнения структуры КА (ЭРИ, оборудование, системы и КА в целом).
6. Назовите состав и дайте характеристику документов контракта на создание КА, в которых реализуются требования методологии.
7. Дайте характеристику документов контроля полноты реализации требований контракта на создание КА – паспорт квалификации бортового оборудования и матрица верификации контрактных требований.
8. Дайте определение процедуре «Рассмотрение» как формы локального контроля заказчиком хода и качества выполнения работ по проекту.
9. Объясните отличие процедуры «Рассмотрение» от принятой в отечественной практике процедуры «Совещание».
10. Опишите принципы организации процедур рассмотрений.
11. Перечислите виды и цели рассмотрений, выполняемых заказчиком на этапах проекта.

Глава 8. ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЮ НА ЭТАПАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТОВ

8.1. Рассмотрение системных требований (SRR)

Рассмотрение системных требований (SRR) проводится, как правило, после подписания контракта с целью гарантирования полного и однозначного понимания генеральным подрядчиком заданных требований к продукции, выявления и исправления возможных несоответствий в требованиях и согласований необходимых компромиссов, которые могут привести к улучшению характеристик продукции.

SRR могут выполняться отдельно или в составе установочных встреч (Kick-off), в ходе которых обсуждаются:

- а) организационные вопросы выполнения требований ТЗ:*
 - основные технические решения;
 - схема деления КА;
 - перечень ТЗ и протоколов разрешения применения (ППП) на составные части КА;
 - обеспечение распространения требований контракта на подрядчиков;
 - ведомость эскизного проекта (ЭП);
 - выявленные на данном этапе проблемные вопросы технической реализации проекта;

- б) вопросы по обеспечению заданного срока эксплуатации КА на ГСО:*
 - модель внешних воздействующих факторов (ВВФ), включая радиационные факторы);
 - принципы выбора и квалификация комплектующих ЭРИ;
 - объемы испытаний при наземной экспериментальной отработке (НЭО);
 - порядок подтверждения и верификации квалификационных требований;

- в) организационные вопросы выполнения проекта и обеспечения гарантий качества:*
 - генеральный график работ по проекту;
 - план-график совместных организационных и технических работ по проекту (если предусмотрен контрактом);
 - матрица контроля работ по созданию КА;
 - план этапных рассмотрений, проводимых по проекту;
 - ключевой персонал со стороны генерального подрядчика и со стороны заказчика.

8.2. Рассмотрение состояния квалификации оборудования (EQSR) и бортовых систем

При данном рассмотрении заказчику должна быть продемонстрирована обоснованность предложений подрядчиков по квалификационному статусу каждого типа оборудования и бортовых систем.

Рассмотрение состояния квалификации оборудования и бортовых систем проводится путем многофакторного сравнения предлагаемых оборудования и систем с их квалифицированными прототипами.

Рассмотрение состояния квалификации оборудования заключается в анализе степени соответствия прототипа заданным условиям эксплуатации и требованиям к функциональным характеристикам и ресурсу. В зависимости от результатов анализа прототипа, наличия лётного опыта его использования на рассмотрении должна быть определена категория квалификации оборудования, необходимого для выполняемого проекта, и объем испытаний для подтверждения полной квалификации оборудования на соответствие заданным контрактом (договором, ТТЗ, ТЗ) требованиям.

Типовая программа рассмотрения состояния квалификации оборудования КА и методические рекомендации по выполнению данного рассмотрения представлены соответственно в **прил. Б и В**.

Каждое оборудование должно быть отнесено к одной из следующих категорий квалификации (в соответствии с их определениями, приведенными в п. 5.1.1 книги): А (D), Б (C), В (B), Г(A). Здесь в круглых скобках для справки указаны обозначения соответствующих категорий квалификации оборудования, принятые в стандартах Европейского космического агентства (ЕКА).

При выполнении ESQR не следует относить рассматриваемое оборудование к категориям Б, В и Г на основе незавершенных результатов квалификационных испытаний оборудования, выполняемых в других проектах, до их завершения и проверки заказчиком полного соответствия методик и результатов испытаний требованиям выполняемого контракта.

В зависимости от присвоения той или другой категории квалификации оборудования определяется план необходимых анализов и испытаний и типы отработочных моделей для проведения квалификации.

В общем случае для подтверждения квалификации оборудования могут использоваться следующие виды моделей:

– **лабораторная модель (ЛМ)** – предназначена для проверки правильности принятых функциональных и схемных решений создания оборудования, должна иметь функциональные характеристики, соответствующие лётному оборудованию, однако она не обязательно должна соответствовать ему по построению, применяемым ЭРИ и процедурам изготовления и контроля;

– **инженерная модель (ИМ)** – предназначена для проверки правильности принятых функциональных и схемно-конструктивных решений, должна иметь такое же построение и рабочие характеристики, что и соответствующее лётное

оборудование, однако не обязательно должна соответствовать ему по уровню качества применяемых комплектующих ЭРИ, а также по процедурам изготовления и контроля и использованию ЭРИ лётного типа;

– **инженерно-квалификационная модель (ИКМ)** – предназначена для подтверждения функциональных и конструктивных требований, должна быть идентичной по построению, процессам изготовления, процедурам контроля соответствующему лётному оборудованию. Допускается применение ЭРИ более низкого (чем для лётного оборудования) уровня качества от того же поставщика и с идентичными рабочими характеристиками. ИКМ не является лётным оборудованием. Должна быть испытана в условиях внешних воздействий на квалификационных уровнях, подвергается граничным и ресурсным испытаниям;

– **квалификационная модель (КМ)** – должна быть полностью идентичной по построению, комплектующим ЭРИ, материалам, процессам изготовления и процедурам контроля соответствующему лётному оборудованию. КМ относится к оборудованию лётного типа. Однако она не может применяться в качестве лётного блока, она должна быть полностью испытана в условиях внешних квалификационных воздействий на уровне оборудования;

– **опытный образец изделия (опытное изделие (ОИ))** – образец продукции, изготовленный (доработанный, модернизированный) по вновь разработанной КД и ТД для испытаний, в том числе лётных испытаний, и проверки на соответствие установленным требованиям;

– **протолётная модель (ПМ)** – должна быть полностью идентичной по построению, комплектующим ЭРИ, материалам, процессам изготовления и процедурам контроля соответствующему лётному оборудованию. Протолётная модель оборудования является первой лётной моделью. Она должна быть подвергнута испытаниям на протолётные квалификационные уровни нагрузок и продолжительности их воздействия. Дополнительная квалификация проводится во время лётных испытаний КА;

– **лётное изделие (модель) (ЛИ)** – должно использовать квалифицированные комплектующие ЭРИ, материалы, процессы изготовления, процедуры контроля. Это изделие (модель) должно быть подвергнуто полному объёму приёмочных испытаний.

По результатам EQSR должен быть выпущен «Перечень состояния квалификации», в котором приводится сводная информация по категории квалификации каждого оборудования КА.

Перечень должен содержать следующую информацию:

– наименование и обозначение оборудования, вхождение оборудования в объект более высокого уровня разукрупнения;

– название организации-разработчика и организации-изготовителя оборудования;

– квалифицированный прототип оборудования;

– категория квалификации (А, В, С или D) оборудования, предложенная поставщиком и принятая заказчиком;

- объем необходимых дополнительных квалификационных испытаний и анализов оборудования;
- наименование проекта, в котором планируются дополнительные квалификационные испытания оборудования;
- планируемые для создания отработочные модели (ЛМ, ИМ, ИКМ, КМ, ОИ, ПМ, ЛИ), которые будут изготовлены и испытаны в рамках рассматриваемой программы;
- этапы последующих плановых рассмотрений с учетом конкретной категории квалификации.

Результаты рассмотрения состояния квалификации оборудования используются для принятия решений по необходимости квалификационных испытаний более высоких конфигурационных уровней проекта и их объему.

Если при последующих работах по проекту (или вне проекта) будет получена информация о необходимости корректировки установленной категории квалификации оборудования, то должно проводиться повторное EQSR (дельта – EQSR) в объеме и по программе, согласованными с заказчиком.

Типовая программа рассмотрения квалификации бортовых систем КА приведена в **прил. Г**. При выполнении данного рассмотрения целесообразно учитывать методические рекомендации, изложенные в **прил. В**.

Критериями отнесения бортовых систем к категории квалификации А, В, С или D являются:

- категории квалификации применяемого в системах оборудования;
- результаты сравнения функциональных схем, интерфейсов, режимов работы, логики функционирования и ПО рассматриваемой бортовой системы и прототипа.

8.3. Предварительное рассмотрение проекта (PDR)

Целью предварительного рассмотрения проекта является оценка концепции построения, реализуемости и соответствия ожидаемых характеристик, создаваемых КА, их СЧ, подсистем и оборудования требованиям контракта, конкретизация планов их проектирования и разработки.

По результатам завершения данного рассмотрения разрешается переход к детальной разработке КА, его СЧ, подсистем и оборудования.

Типовая программа PDR приведена в **прил. Д**.

На PDR должны подвергаться анализу проектные материалы, содержащие:

- техническое описание проекта и обоснование выбора основных технических решений, характеристик систем, схемы деления КА и его составных частей;
- общую конфигурацию КА, его внешнюю и внутреннюю компоновку (включая чертежи общего вида, теоретические и габаритные чертежи), функциональные и электрические схемы систем, их описания;

- состав (включая приборы и агрегаты) и описание платформы и Пн, их характеристики и описание функционирования;
- интерфейсы КА с применяемыми средствами выведения, необходимые мероприятия по адаптации КА к средствам выведения;
- интерфейсы КА с используемыми наземными средствами управления при эксплуатации на орбите, перечни телеметрии и команд;
- программу полета КА, включая основные сведения по порядку проведения ЛИ;
- обоснование условий эксплуатации КА, систем, агрегатов и приборов на различных этапах наземной подготовки и лётной эксплуатации, включая механические воздействия (вибрации, удары), тепловые нагрузки, радиационные факторы и др.;
- архитектурный проект бортового программного обеспечения на уровне оборудования, бортовых систем и КА в целом;
- анализ нештатных ситуаций (НШС) в системах и оборудовании КА, их перечень и мероприятия по выходу из НШС;
- перечни критичных элементов и результаты анализа основных технических рисков по принятым новым техническим решениям;
- бюджеты КА для всех режимов эксплуатации с учетом деградации характеристик КА, включая бюджеты энергетики, масс, запасов топлива ДУ, погрешности ориентации антенн Пн, энергетики полезной нагрузки и командной радиолинии и др.;
- необходимые проектные расчеты, включая расчеты аэродинамики, теплообмена, разделения и отделения КА от средств выведения, нагрузок на КА и его прочности, баллистики выведения КА в заданную орбитальную позицию и удержания в этой позиции (с учетом различных ограничений), процесса раскрытия солнечных батарей и антенн, точности ориентации КА, надежности КА и др.;
- описание предлагаемой технологии изготовления и испытаний КА и составных частей, данные о готовности технологической документации, отработанности технологических процессов, наличии специальных процессов и оснастки, требующих дополнительной отработки и аттестации;
- требуемые анализы, включая анализы электромагнитной совместимости (ЭМС) систем КА, стойкости систем и приборов к электростатическому разряду (ЭСР), работоспособности аппаратуры при критических уровнях давления, критичных элементов и устойчивости бортовых систем и оборудования КА к единичным отказам и др.;
- комплексную увязку командной радиолинии с учетом логики и алгоритмов функционирования и энергетических характеристик бортовой и наземной аппаратуры управления;
- данные об особенностях функционирования и эксплуатации КА, сроках и условиях хранения, транспортирования, о регламентных проверках и техническом обслуживании;

- проектные программы обеспечения надежности и безопасности КА (включая все анализы, проводимые в развитие этих программ);
- обоснование необходимости проведения экспериментальной отработки КА, его составных частей и элементов на макетах и отработочных образцах, комплексную программу экспериментальной отработки КА, программы экспериментальной отработки составных частей и элементов КА;
- перечень методик проведения наземных и лётных испытаний и методик оценки их результатов, в том числе методик оценки соответствия подтверждаемых характеристик;
- проектные перечни применяемых материалов и комплектующих ЭРИ, перечни технологических процессов;
- данные о состоянии и необходимости дооснащения производственных мощностей генерального подрядчика и субподрядчиков, технического комплекса полигона и стартового комплекса;
- перечень эксплуатационной документации;
- протоколы (спецификации) интерфейсов КА со средствами выведения, интерфейсов систем КА;
- перечень спецификаций на КА, системы, оборудование;
- технические спецификации на системы и оборудование КА;
- матрицу соответствия характеристик КА требованиям технического задания;
- матрицы соответствия характеристик оборудования и систем КА требованиям технических заданий (спецификаций).

В период PDR, при необходимости подготовки производственной базы к изготовлению, особенно при изготовлении вновь разрабатываемой продукции, у изготовителя рассматривается общая готовность к изготовлению лётных изделий и определяются актуальные задачи технологического дооснащения (при необходимости).

Если при последующих работах по проекту (или вне проекта) будет получена информация о необходимости корректировки проектной документации, то должно проводиться повторное PDR (дельта-PDR) в объеме и по программе, согласованными с заказчиком.

8.4. Рассмотрение готовности к изготовлению оборудования (MRR)

Данное рассмотрение проводится на уровнях бортового оборудования и КА и, как правило, выполняется дважды:

- на этапе эскизного проекта с целью предварительного анализа технологической вооруженности подрядных организаций и их способности к изготовлению объектов требуемого качества в установленные контрактом сроки;
- после завершения разработки конструкторской документации перед непосредственным изготовлением лётного (протолётного) объекта с целью выявления и устранения предпосылок к внесению производственных дефектов, свя-

занных с возможными скрытыми недостатками применяемых технологических процессов, оснастки, оборудования, условий производства, Ки и обученности персонала.

Рассмотрение проводится путем анализа технической документации, материалов, подтверждающих выполнение требований, а также путем непосредственной проверки состояния условий производства и персонала на рабочих местах изготовления и испытаний оборудования, систем и КА.

Типовая программа MRR и методические рекомендации по выполнению данного рассмотрения приведены соответственно в **прил. Е и Ж**.

В процессе MRR на этапе эскизного проекта (на рис. 7.3 данное рассмотрение обозначено как MRR 1) подлежат проверке:

- состояние культуры производства, выполнение установленных требований по производственной гигиене на специализированных участках изготовления и испытаний оборудования, систем и КА;

- наличие действующей системы аттестации рабочих мест, где проводятся изготовление и испытания оборудования, систем и КА;

- наличие персонала, квалификация которого соответствует требуемому уровню сложности выполняемых работ по изготовлению, сборке и испытаниям и контролю качества;

- наличие системы обеспечения рабочих мест необходимой КД и ТД, наличие и достаточность средств технологического оснащения, измерений и испытаний, состояние метрологического обеспечения производства;

- отработанность (квалификация) технологических процессов;

- наличие системы формирования и контроля перечней критичных технологических процессов и особо важных (ответственных) операций сборки, регулировки, настройки, испытаний и контроля;

- опыт работ в соответствии с «Перечнем точек контроля обязательных» (ТКО);

- эффективность системы управления несоответствиями, выявленными в процессе изготовления и испытаний, оперативность и полнота разработки и реализации мероприятий по устранению и предотвращению повторяющихся несоответствий;

- наличие инструкций и руководств по действиям персонала при несоответствиях, фиксируемых в процессе проведения испытаний;

- наличие системы поддержания готовности испытательного оборудования и средств испытаний на внешние воздействия (аттестация, поверка, калибровка приборов), в том числе оборудования и средств, используемых при выполнении особо важных операций технологического процесса;

- условия хранения материалов, комплектующих и ЭРИ и система обеспечения их прослеживаемости;

- загрузка основных производственных мощностей на период выполнения работ;

- порядок обеспечения процесса изготовления материалами, комплектующими и ЭРИ требуемого уровня качества.

Программа MRR перед непосредственным изготовлением Ли (на рис. 7.3 данное рассмотрение обозначено как MRR 2) дополнительно должно включать проверку:

- выполнения требований по производственной гигиене, аттестации оборудования и рабочих мест непосредственно на тех производственных участках, где должны проводиться изготовление и испытания оборудования, систем и КА по проекту ОАО «ГКС»;

- аттестации персонала, который должен выполнять работы по изготовлению и испытанию оборудования, систем и КА по проекту ОАО «ГКС»;

- готовности и наличия на рабочих местах всей необходимой КД и ТД;

- наличия в ТД указаний о проведении контрольных операций, выполняемых с обязательным участием заказчика (точки контроля обязательные – ТКО), и операций контроля, выполняемых силами служб контроля качества предприятия (точки контроля ключевые – ТКК);

- наличия полного комплекта необходимых составных частей, комплектующих и ЭРИ требуемого качества для изготавливаемой материальной части по проекту ОАО «ГКС».

Обобщенные результаты работ по анализу состояния производства отечественных предприятий космической отрасли достаточно красноречиво указывают на эффективность проведения MRR. Так, в ходе работ по проектам создания одного из КА типа «Ямал» выявлены многочисленные недостатки готовности производств предприятий кооперации:

- недостаточные меры защиты от разрядов статического электричества (характерно для 64% от общего числа предприятий кооперации);

- не аттестованы штампы для формовки выводов ИС (40%);

- не обеспечены требования по производственной гигиене и параметрам внешней среды (15%).

В рамках работ по проверке готовности производств наряду с приборными предприятиями проверкам подвергаются и испытательные технические центры (ИТЦ). В ходе работ по проекту проводятся рассмотрения:

- готовности испытательных технических центров (ИТЦ) к испытаниям и отбору комплектующих ЭРИ отечественного производства в соответствии с программой дополнительных испытаний, согласованной с заказчиком;

- результатов работы ИТЦ в части соответствия качества, поставленных ими комплектующих ЭРИ требованиям контракта и программы дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ.

Типовые программы выполнения данных рассмотрений и соответствующие методические рекомендации приведены в **прил. 3, И и К**.

Высокая результативность проведения рассмотрений в части готовности ИТЦ и выполнения ими испытаний комплектующих ЭРИ иллюстрируется следующим. В результате работ по обеспечению комплектующими ЭРИ бортовой аппаратуры одного из КА типа «Ямал» из 175 893 шт. проверенных ЭРИ было забраковано 1 808 шт. (1,03%) как потенциально ненадежные и 789 шт. (0,45%)

как не соответствующие нормам ТУ. Для другого КА типа «Ямал» аналогичные данные имеют вид: из 147 636 шт. ЭРИ потенциально ненадежные – 1 716 шт. (1,16%), брак по нормам ТУ – 26 шт. (0,02%).

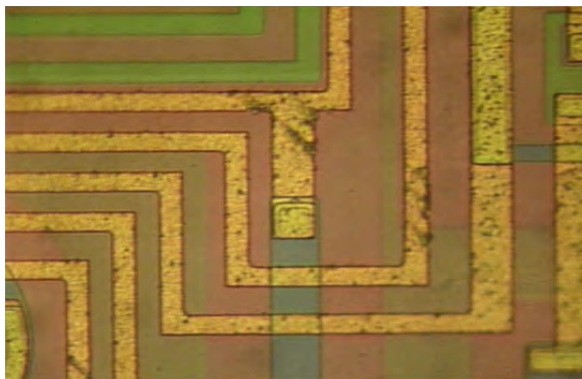


Рис. 8.1. Следы коррозионного разрушения металлизации в ИС

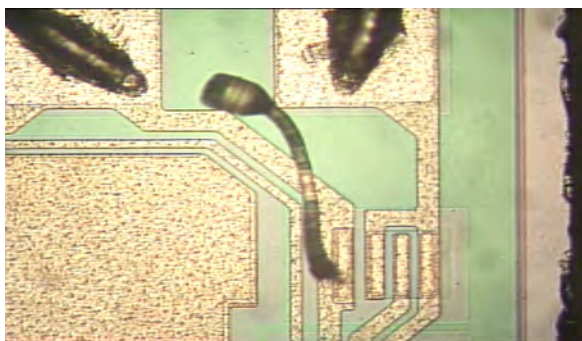


Рис. 8.2. Посторонняя частица внутри корпуса ИС



Рис. 8.3. Растрескивание и отслаивание металлизации ИС

На рис. 8.1–8.3 приведены примеры видов дефектов, выявленных в ИТЦ при испытаниях ЭРИ (выборочный разрушающий физический анализ).

8.5. Критическое рассмотрение проекта (CDR)

Целью критического рассмотрения проекта (CDR) является обеспечение возможности для заказчика рассмотреть и удостовериться в завершении проектирования и квалификации оборудования, бортовых систем и КА в целом.

Завершение CDR позволяет утвердить рабочую конструкторскую документацию (РКД) по разработке и проектированию КА и его составных частей, подсистем и оборудования. На данном этапе выполнения проекта должны быть завершены квалификационные испытания оборудования модели ИКМ (или модели КМ) и подтверждены характеристики оборудования и бортовых систем, определенные на этапе PDR или в спецификациях.

Важность выполнения требуемой этапности работ по проекту и недопущению изготовления штатного (лётного) комплекта оборудования до завершения квалификации (наземной экспериментальной отработки – НЭО) иллюстрируется рис. 8.4, 8.5. На рис. 8.4 приведена фотография штатного прибора, в котором произошло выгорание элементов внутреннего объема из-за неотработанности на этапе НЭО вопросов обеспечения электропрочности и техпроцесса монтажа ЭРИ на печатные платы. На рис. 8.5 показаны результаты доработки штатного прибора из-за несвоевременности выявления низкой радиационной стойкости примененных ЭРИ, введения элементов защиты и экранов.

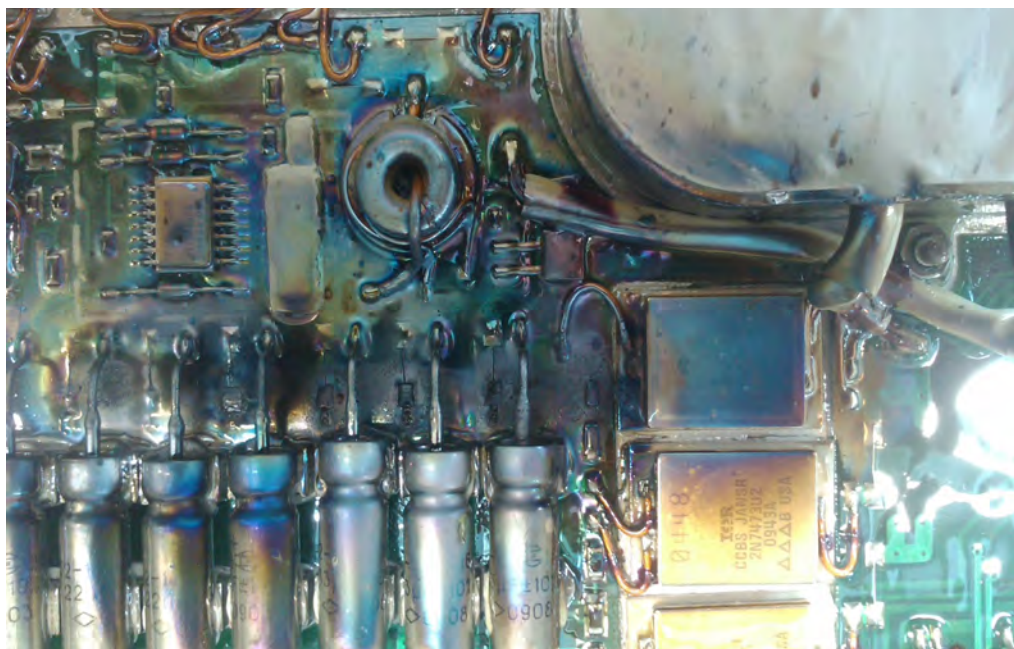


Рис. 8.4. Внутренний объем прибора после воздействия плазменной дуги

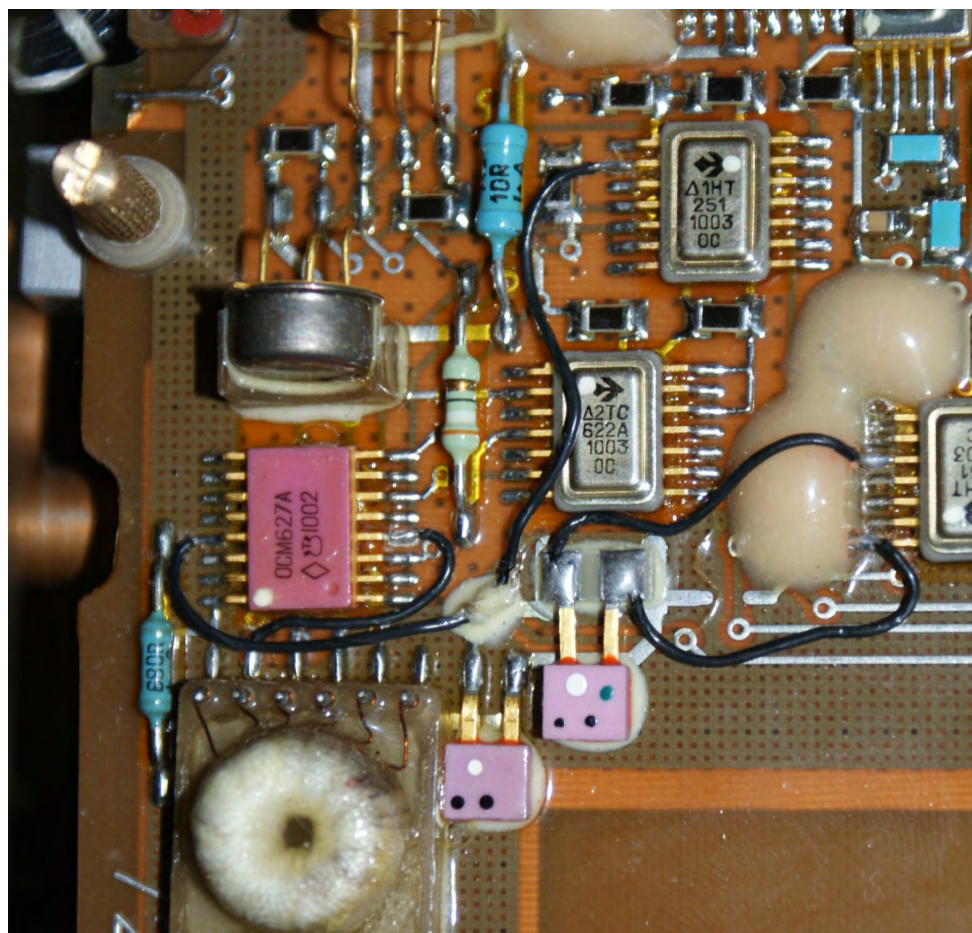


Рис. 8.5. Доработка платы штатного прибора из-за необходимости повышения ее стойкости к ионизирующим излучениям

Типовая программа CDR приведена в **прил. Л**.

В процессе CDR должны быть последовательно (с возможным временным интервалом в соответствии с графиком выполнения этапа по выпуску КД) рассмотрены:

- рабочая КД (чертежи и схемы, необходимые для формирования и разработки комплекта технологической документации и обеспечения процесса изготовления оборудования и КА);
- программно-методическая документация, обеспечивающая возможность проведения испытаний оборудования, бортовых систем и КА;

– эксплуатационная документация, охватывающая этапы работы с оборудованием, бортовыми системами и КА на наземных этапах жизненного цикла, а также при запуске и эксплуатации КА на ГСО.

В целом в процессе CDR должны быть проверены:

– соответствие комплектности разработанной КД утвержденному «Перечню разрабатываемой документации...»;

– матрица соответствия оборудования, бортовых систем и КА требованиям ТЗ (по результатам испытаний и анализов, включая анализы надежности, радиационной стойкости, нештатных ситуаций и др.);

– завершенность и результаты квалификационных испытаний и их соответствие КПЭО;

– выявленные в процессе квалификации несоответствия, причины несоответствий, достаточность принятых мер по их устранению и предупреждению повторяемости;

– результаты анализов и испытаний по подтверждению совместимости оборудования и бортовых систем, интерфейсных связей внутри КА и его систем;

– программы и объем контроля критичных элементов оборудования, систем и КА при изготовлении и испытаниях;

– программа дополнительных испытаний комплектующих ЭРИ в испытательных технических центрах (ИТЦ);

– перечни применяемых материалов, деталей и комплектующих ЭРИ и их соответствие утвержденным ограничительным перечням и требованиям по квалификации;

– материалы (в том числе карты рабочих режимов ЭРИ), подтверждающие правильность применения комплектующих ЭРИ в бортовой аппаратуре (по условиям и режимам работы с учетом установленных ограничений на коэффициенты нагрузки);

– качество разработки и отработки программного обеспечения (ПО) на уровне оборудования, бортовых систем и КА в целом, включая проверку идентичности используемых при отработке ПО моделей (имитаторов) фактическим характеристикам объектов КА;

– полнота и достаточность программ приемочных испытаний;

– состояние с выпуском регламента передачи управления КА и регламента поддержки управления КА со стороны генерального подрядчика и подрядчиков при штатной эксплуатации КА;

– выполнение поручений предыдущих рассмотрений, полноты их выполнения, достаточность материалов, подтверждающих выполнение поручений.

На этапе разработки рабочей документации и проведения CDR радиоэлектронного оборудования КА необходимо проверить, что исполнителями приняты необходимые меры по обеспечению правильного применения комплектующих ЭРИ.

Типовая программа проверки правильности применения комплектующих ЭРИ и методические рекомендации по проведению данной работы примени-

тельно к оборудованию, разработанному отечественными предприятиями, приведены соответственно в **прил. М** и **Н**.

Опыт работ показал, что в организации работ по обеспечению правильности применения комплектующих ЭРИ на отечественных предприятиях имеются недостатки. Так, при выполнении проверок по проектам создания двух КА типа «Ямал» в 17 типах бортовой аппаратуры были выявлены нарушения режимов работы или схем включения 21 типа комплектующих ЭРИ (в 111 схемных позициях). Для оценки значимости данных нарушений следует иметь в виду, что по экспертным оценкам применение с нарушением режимов работы 0,01% от числа примененных ЭРИ увеличивает вероятность отказа аппаратуры в 5–7 раз.

В табл. 8.1 приведены примеры выявленных в бортовой аппаратуре нарушений по режимам работы и схемам включения Ки. Устранение выявленных нарушений потребовало доработки аппаратуры.

Методические рекомендации по проверке анализов и расчетов надежности оборудования КА приведены в **прил. О**, анализов стойкости оборудования к воздействию ионизирующих излучений космического пространства по дозовым эффектам – в **прил. П**, к воздействию заряженных частиц космического пространства по эффектам одиночных событий – в **прил. Р**.

По завершении CDR должен быть оформлен протокол с поручениями по устранению выявленных в процессе рассмотрений недостатков, сроков их выполнения и сроков завершения невыполненных работ.

При положительных результатах CDR дается разрешение на изготовление лётного (протолётного) КА или его СЧ (в соответствии с уровнем проводимого рассмотрения).

Если при последующих работах по проекту (или вне проекта) будет получена информация о необходимости корректировки проектной документации (ПД) и (или) КД, то должно быть предусмотрено проведение повторного CDR (дельта-CDR) в объеме и по программе, согласованными с заказчиком.

При наличии технического обоснования по согласованию с заказчиком генеральный подрядчик (подрядчик) может начать изготовление продукции до завершения соответствующего уровня критического рассмотрения проекта. При этом генеральный подрядчик (подрядчик) несёт полную ответственность за риск необходимости переделки или изготовления вновь материальной части.

При подготовке к согласованию заказчиком указанного выше технического обоснования на изготовление лётной материальной части до полного завершения квалификации и CDR необходимо учитывать, что, как правило, связанный с этим решением риск приводит к снижению качества изготовленной материальной части.

Примеры нарушений режимов работы бортовой аппаратуры

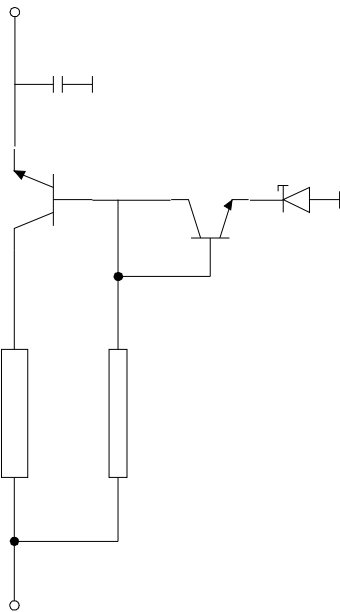
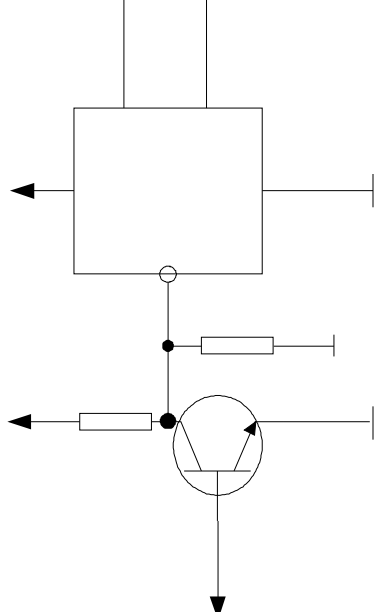
Схема с нарушениями режимов работы ЭРИ	Вид нарушения	Рекомендации
<p data-bbox="264 643 315 1345">Использование транзисторов в диодном включении (чаще всего из состава транзисторных сборок 1НТ251, 198НТ5, 2ТС622 и т.п.)</p> 	<p data-bbox="444 693 547 1007">Схема включения транзистора не соответствует функциональному назначению транзисторов, описанному в ТУ</p>	<p data-bbox="444 231 547 674">Заменить транзисторы на диоды с необходимыми характеристиками. Согласовать установленным порядком приращение транзисторов в качестве диодов</p>
<p data-bbox="683 981 709 1480">Превышение входных напряжений на микросхеме при совместной работе с дискретными элементами</p> 	<p data-bbox="843 711 972 1007">Превышение допустимого по ТУ на ИС входного уровня логической «1» из-за различия напряжений питания ИС и схемы на дискретных элементах</p>	<p data-bbox="856 212 959 674">Привести в соответствие с требованиями ТУ уровни выходных сигналов схем на дискретных элементах с допустимыми уровнями для входов логической ИС</p>


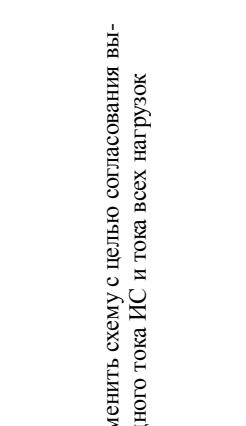
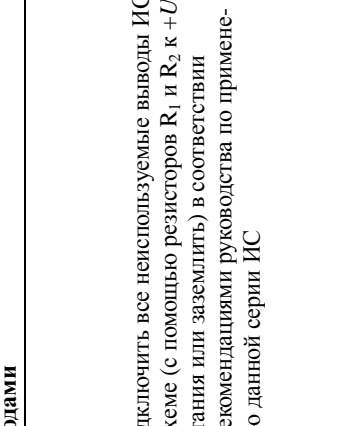
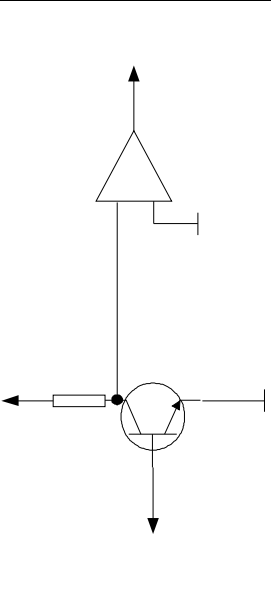
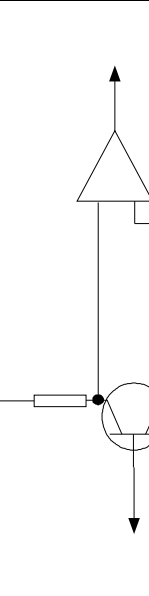
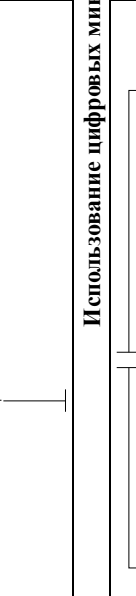
Схема с нарушениями режимов работы ЭРИ	Вид нарушения	Рекомендации
<p>Превышение выходных токов для микросхем при работе на схеме, собранные на дискретных элементах</p>  	<p>Выходной ток $I_{н1}$ ИС превышает допустимую величину из-за малой величины сопротивления резистора R</p> <p>Выходной ток $I_{н1}$ ИС превышает допустимую величину из-за того, что не было учтено влияние на нагрузку $R_{н2}$</p>	<p>Увеличить сопротивление резистора R или изменить схему подключения к ИС дискретных элементов</p> <p>Изменить схему с целью согласования выходного тока ИС и тока всех нагрузок</p>
<p>Использование микросхем ТТЛ с недействующими выводами</p> 	<p>Отдельные выводы ИС ТТЛ не используются и не присоединены к точке схемы с фиксированным потенциалом</p>	<p>Подключить все неиспользуемые выводы ИС к схеме (с помощью резисторов R_1 и R_2 к $+U$ питания или заземлить) в соответствии с рекомендациями руководства по применению данной серии ИС</p>

Схема с нарушениями режимов работы ЭРИ	Вид нарушения	Рекомендации
<p>Совместная работа операционного усилителя и схемы на дискретных элементах – превышение входного дифференциального напряжения</p> 	<p>Выходное напряжение схемы на дискретных элементах превышает допустимое входное для ИС операционного усилителя</p>	<p>Привести в соответствие выходные напряжения схемы на дискретных элементах и допустимые входные напряжения ИС</p>
Использование цифровых микросхем (например, серии 155, LA3) в линейном режиме		
	<p>Схема включения не соответствует функциональному назначению цифровых логических ИС</p>	<p>Применить специализированные ИС генераторов. Согласовать установленным порядком применение ИС в данном линейном режиме</p>
Использование микросхемы стабилизатора напряжения (например, 142ЕН19) как порогового элемента		
	<p>Схема включения не соответствует функциональному назначению ИС стабилизатора напряжения, установленному в ТУ</p>	<p>Применить специализированные ИС компараторов. Согласовать установленным порядком применение ИС в данном включении</p>

8.6. Рассмотрение в точке контроля обязательной (МІР)

Точка контроля обязательная (ТКО) – это характерная точка в технологическом процессе изготовления материальной части, результаты контроля в которой позволяют подтвердить, что все предыдущие процессы и операции изготовления и контроля качества выполнены в соответствии с требованиями КД, ТД и НД.

Перечень ТКО формируется на этапе разработки КД генеральным подрядчиком с учетом предложений подрядчиков. Перечень ТКО подлежит согласованию с заказчиком.

Перечень ТКО охватывает объекты всех уровней разукрупнения КА (комплектующие ЭРИ, бортовое оборудование, составные части КА), в Перечне должны быть указаны этапы работ с материальной частью, на которых проводится рассмотрение. В соответствии с этим требования о проведении рассмотрения в ТКО для конкретной материальной части КА включаются в технологические процессы ее создания отдельной операцией. На ТКО предъявляется материальная часть, проконтролированная (принятая) службой качества (ОТК) предприятия-изготовителя.

Как правило, участие заказчика в работе по рассмотрению качества изготавливаемой материальной части в ТКО является обязательным.

По предложению заказчика в особых случаях рассмотрение в ТКО может быть выполнено силами службы качества предприятия-изготовителя материальной части с предоставлением заказчику полного объема результатов контроля.

Типовая программа рассмотрения в ТКО и соответствующие методические рекомендации представлены соответственно в **прил. С и Т**.

В процессе рассмотрения в ТКО подлежат проверке:

- технология, оборудование, персонал и условия изготовления материальной части на соответствие требованиям КД и ТД;
- примененные Ки, комплектующие ЭРИ и материалы на соответствие требованиям КД по номенклатуре и качеству;
- полнота отражения в технологических паспортах операций технологического процесса и операционного контроля;
- качество изготовленной материальной части, которое должно быть подтверждено фотографированием, выполненным в присутствии заказчика.

В случае ремонта или доработки материальной части после проведения рассмотрения в ТКО данная материальная часть подвергается повторному рассмотрению (дельта-ТКО) в объеме, согласованном с заказчиком.

При выполнении рассмотрений в ТКО при контроле качества изготовления бортового оборудования для одного КА типа «Ямал» из 174 проверенных сборочных единиц было возвращено на доработку для устранения производственных дефектов 24 единицы (14%), а при контроле 167 сборочных единиц приборов для другого КА типа «Ямал» – 27 единиц (16%). При этом были

забракованы окончательно 4 сборочные единицы и потребовалось их повторное изготовление.

На рис. 8.6–8.10 приведены примеры типовых видов производственных дефектов, выявленных при проведении МІР в проектах создания КА типа «Ямал».

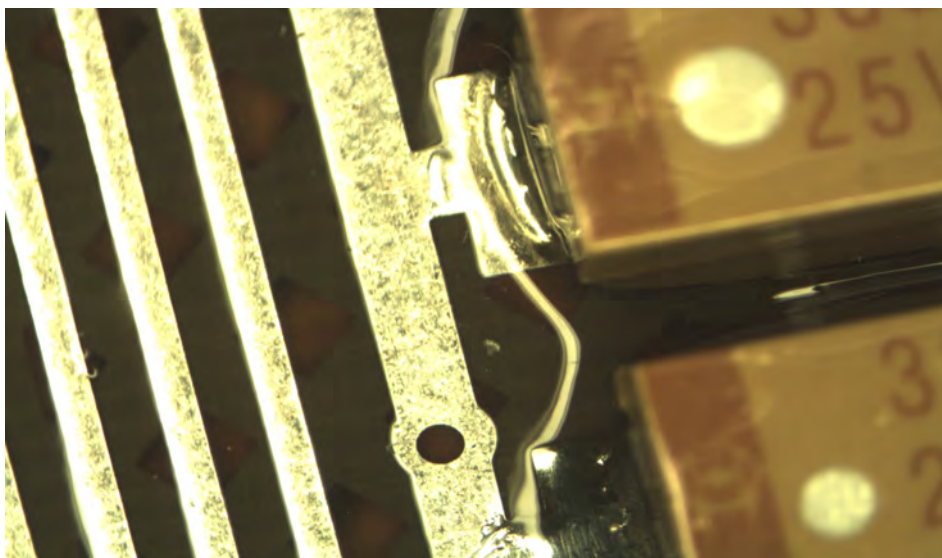


Рис. 8.6. Недостаточное количество припоя при подпайке конденсатора



Рис. 8.7. Излом поверхности пайки



Рис. 8.8. Дефект металлизации печатной платы

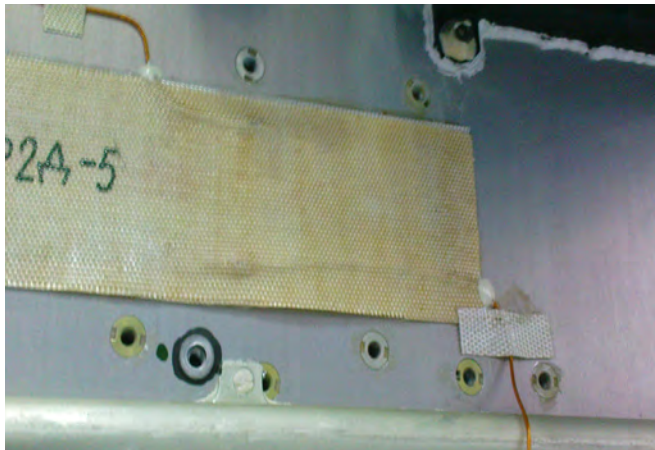


Рис. 8.9. Отслоение нагревателя на панели КА

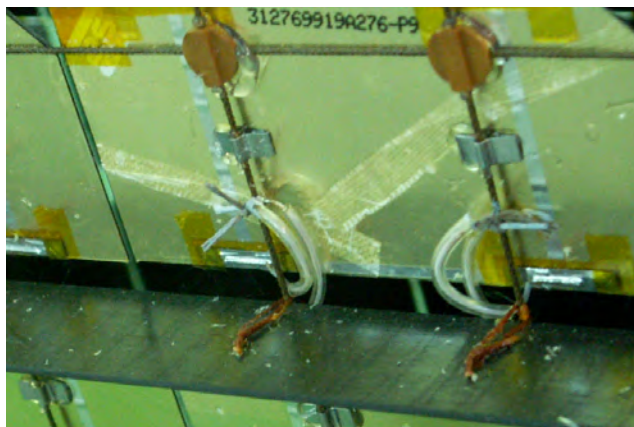


Рис. 8.10. Трещины на поверхности стекла фотопреобразователей батареи солнечной

8.7. Рассмотрение готовности к испытаниям (TRR)

В процессе TRR проводится проверка:

- завершения квалификации подлежащего испытаниям изделия;
- документов, определяющих порядок и методику проведения испытаний;
- завершенности изготовления подлежащего испытаниям изделия и его соответствия требованиям КД;
- готовности испытательного и вспомогательного оборудования;
- готовности испытательного программного обеспечения;
- готовности персонала к проведению испытаний;
- готовности рабочих мест и наличия на рабочем месте применяемой документации;
- соответствия условий внешней среды испытательной конфигурации;
- статуса закрытия несоответствий, выявленных в процессе производства подлежащих испытанию изделий (составных частей изделий), а также при их квалификационных испытаниях;
- организации испытаний, включая проверку наличия и полноту инструкций о действиях персонала при возможных нештатных ситуациях, связанных с состоянием испытываемого изделия или испытательного оборудования.

На уровне оборудования TRR проводится применительно ко всему объему предъявительских (ПрИ) или приемосдаточных (ПСИ) испытаний.

На уровне систем, составных частей КА (платформы и модуля Пн) и КА данное рассмотрение проводится перед каждым видом испытаний (электрические испытания, тепловые испытания, на механические воздействия и др.).

Результаты рассмотрения оформляются протоколом с разрешением начала испытаний.

8.8. Рассмотрение результатов испытаний (TRB)

На уровне оборудования данное рассмотрение проводится, как правило, в рамках DRB.

На уровне бортовой системы и КА данное рассмотрение проводится по окончании каждого этапа испытаний (например, при механических испытаниях – по завершении испытаний на синусоидальную вибрацию, испытаний на случайную вибрацию, на акустические воздействия и т.д.).

Для проведения рассмотрений должен выпускаться экспресс-отчет по завершенному этапу испытаний, содержащий:

- основные результаты испытаний;
- вывод о завершенности этапа испытаний и разрешение перехода к следующему этапу.

8.9. Рассмотрение готовности к поставке (DRB)

Целью рассмотрения готовности к поставке (DRB) является проверка соответствия оборудования и (или) СЧ КА требованиям, заданным в контрактах (ТЗ, спецификациях, договорах), и готовности к поставке и установке на изделия более высокого конфигурационного уровня.

Типовая программа DRB представлена в **прил. У**.

DRB должно также подтвердить, что:

- возможные изменения изготовленной продукции, внесенные после завершения квалификации, не влияют на статус квалификации и подтверждены дополнительной квалификацией (дополнительными испытаниями) в необходимом и достаточном объеме;

- выявленные в процессе изготовления несоответствия исследованы, причины их появления выявлены и устранены, а соответствие продукции заданным требованиям восстановлено;

- приемочные испытания продукции проведены в полном соответствии с утвержденными программами и методиками испытаний, результаты испытаний положительные;

- поручения всех предыдущих рассмотрений по проекту выполнены и приняты заказчиком.

В процессе DRB должны быть рассмотрены:

- сертификат соответствия (копия формуляра, копия паспорта) изготовленной продукции, подтверждающий ее соответствие требованиям контракта (ТЗ, спецификации, договора);

- перечень документов, включающий в себя все КД и ТД, используемые при изготовлении, сборке, испытаниях и контроле продукции с указанием редакции или номера и даты изменения, по которому изготовлен поставляемый образец («как спроектировано»);

- перечень изменений, внесенных в КД и ТД после завершения квалификационных испытаний принимаемой материальной части и реализованных в рассматриваемом образце, с указанием вызвавших их причин и оценкой влияния изменений на категорию квалификации («как сделано»);

- отчет с результатами доквалификации (при необходимости доквалификации из-за внесенных изменений) поставляемой материальной части;

- перечень отказов (RFD) и отклонений (RFW) от требований контракта (ТЗ, спецификации, договора);

- отчеты по рассмотрением в точках контроля обязательных (ТКО) поставляемой материальной части и материалы, подтверждающие реализацию поручений соответствующих протоколов (при их наличии);

- полный перечень несоответствий, выявленных в процессе изготовления и испытаний поставляемого образца (включая КР, ТР, отчеты по исследованию несоответствий и т.д.), и отчеты по результатам исследований несоответствий, влияющих на условия выполнения контракта (ТЗ, спецификации, договора);

- отчеты (протоколы и др.) по результатам всех проведенных испытаний поставляемого образца;
- документы, подтверждающие выполнение программы контроля критичных элементов (при их наличии) в процессе изготовления продукции;
- перечень примененных в продукции комплектующих ЭРИ с указанием номеров партий и протоколов их дополнительных испытаний в ИТЦ;
- сборочный и габаритный чертежи;
- ТУ (спецификация) на КИ в целом с указанием номера редакции или номера изменения;
- схема подключения (с указанием электрических интерфейсных связей поставляемого образца в составе СЧ КА);
- руководство (справочник, инструкция) по эксплуатации (с указанием объема входного контроля, режимов и условий его проведения, процедур упаковывания, обращения, транспортирования, обеспечения безопасности и чистоты и т.д.);
- техническое описание;
- отчеты по закрытию замечаний и несоответствий, выявленных на ранее поставленной материальной части, и предупреждению их повторяемости на рассматриваемом комплекте оборудования;
- перечень незавершенных работ с указанием сроков их завершения.

В случае необходимости в процессе DRB могут быть проверены технологические паспорта или формуляры (паспорта, этикетки) и другие подтверждающие качество изготовления документы на СЧ поставляемой материальной части.

При проведении DRB должен быть проведен внешний осмотр готовой материальной части, при этом должны контролироваться:

- целостность поставляемого оборудования, отсутствие нарушений покрытия, ржавчины, загрязнений и т.д.;
- наличие маркировки (обозначения оборудования, заводского номера и организации-изготовителя) на соответствие КД;
- наличие крышек на соединителях и пломб в соответствии с КД;
- соответствие продукции требованиям «чистый на вид по частицам» и «чистый на вид по неиспаряющемуся остатку»;
- состояние элементов заземления на соответствие КД и т.д.

В процессе DRB должно быть проконтролировано также состояние готовности транспортировочной тары, в том числе:

- соответствие тары требованиям КД;
- состояние крепежных элементов;
- наличие упаковочных материалов (чехлы, упаковочная бумага и т.д. не должны создавать условия для загрязнения продукции при транспортировании, распаковывании);
- наличие указателей по расположению продукции (при необходимости);
- наличие маркировки с указанием классификации требований по обращению с грузом при транспортировании и такелажных работах;
- состояние и чистота тары и т.д.;

– наличие и работоспособность приборов, регистрирующих условия транспортирования (перегрузки, удары, температуру, влажность и др.), если это предусмотрено КД.

Протокол по результатам DRB должен содержать заключение о разрешении поставки материальной части предприятию-потребителю или о запрещении поставки, его причинах и условиях, которые необходимо выполнить для разрешения поставки.

8.10. Рассмотрение завершения изготовления КА (FMCR), готовности к запуску (LRR), результатов лётных испытаний и заключительная приемка КА на орбите (FQR)

Рассмотрение завершения изготовления лётного изделия (FMCR) должно проводиться для всех КА (включая протолётные модели) после завершения этапа сборки, интеграции и испытаний.

Во время FMCR, как правило, проводится приёмка КА заказчиком на заводе-изготовителе (CRR).

Целью FMCR является подтверждение характеристик КА, бортовых систем и оборудования, квалификации КА и возможности его запуска.

В процессе проведения FMCR рассматриваются следующие вопросы:

– завершенность изготовления КА, завершение всех интеграционных испытаний и проверок рабочих характеристик, которые требуется провести до FMCR, включая рассмотрение всех результатов и отчетов по испытаниям, аномалиям и несоответствиям, которые подтверждают, что требуемые характеристики подтверждены и КА допускается к ЛИ;

– подтверждение того, что испытания протолётной модели КА в достаточной мере продемонстрировали способность КА соответствовать техническим требованиям при заданных внешних воздействиях;

– соответствие технических и эксплуатационных характеристик КА по результатам анализа и испытаний требованиям контракта (ТЗ, спецификации, договора) требованиям (матрица соответствия), включая итоговый отчёт о готовности КА к запуску;

– имевшие место в процессе изготовления КА несоответствия, результаты анализа и достаточность принятых мер по их устранению;

– наличие и содержание сертификата соответствия (формуляра, паспорта) на КА;

– допустимость и оформление (согласование с заказчиком) отклонений от требований контракта (ТЗ, спецификации, договора);

– выполнение поручений ранее проведенных рассмотрений;

– готовность эксплуатационных процедур, в том числе программы испытаний КА на орбите;

- готовность контейнера к транспортировке КА на полигон запуска;
- готовность наземного вспомогательного оборудования для подготовки КА на полигоне запуска;
- завершенность планов и процедур испытаний КА при подготовке к запуску;
- полнота сопроводительной документации на КА и соответствие ее состава согласованному комплекту документов на законченное изделие.

В завершение FMCR и CRR должны быть проведены внешний осмотр КА и фотографирование (по согласованному заказчиком перечню позиций).

При удовлетворительном завершении рассмотрений FMCR и CRR оформляются:

- заключение и отчет по результатам приемки;
- разрешение на транспортировку КА на полигон запуска.

Рассмотрение готовности к запуску (LRR) проводится непосредственно перед запуском КА с целью подтверждения его готовности к запуску.

Порядок и объем рассмотрения должны соответствовать Положению РК-11-КТ (РК-98-КТ) и включать в себя проверку наличия:

- решения заказчика о проведении ЛИ КА и назначении Государственной комиссии по проведению ЛИ;
- программы ЛИ КА и космического комплекса;
- акта о готовности наземных средств связи и управления КА.

Целью рассмотрения результатов ЛИ и заключительной приемки КА на орбите (FQR) являются:

- анализ соответствия результатов ЛИ и определение мер, которые необходимо принять для парирования выявленных при испытаниях несоответствий или аномалий;
- рассмотрение готовности КА к приемке и эксплуатации по целевому назначению.

Рассмотрение должно гарантировать, что характеристики КА на орбите соответствуют критерию приемки, определенному в программе ЛИ.

В процессе FQR анализу подвергают:

- полноту выполнения программы ЛИ;
- сводные данные по ЛИ КА, бортовых систем и оборудования;
- результаты сравнения характеристик КА, полученных при лётных и наземных испытаниях;
- отчет по испытаниям, подтверждающий соответствие характеристик КА всем требованиям, определенным в спецификации (ТЗ);
- полноту, достаточность и качество обработки ЭД и степень её пригодности для обеспечения эксплуатации КА.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении системных требований.

2. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении состояния квалификации бортового оборудования и бортовых систем.
3. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при предварительном рассмотрении проекта.
4. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при критическом рассмотрении проекта.
5. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении готовности к изготовлению оборудования.
6. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении в точке контроля обязательной.
7. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении готовности к испытаниям.
8. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении результатов испытаний.
9. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении готовности к поставке.
10. Назовите основные вопросы, подлежащие анализу при рассмотрении завершения изготовления КА, готовности к запуску, результатов лётных испытаний и заключительной приемки КА на орбите.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

В учебном пособии используются следующие понятия и определения теории надежности технических систем.

Понятия и определения

Система – технический объект, предназначенный для выполнения определенных функций.

Элемент – объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которой не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния (состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима, невозможна или нецелесообразна) при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (НД) и (или) конструкторской (проектной) документации (КД).

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической (НД) и (или) конструкторской (проектной) документации (КД).

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НД и (или) КД.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Дефект – каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям.

Скрытый дефект – дефект, не выявляемый действующими правилами, методами и средствами.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Причина отказа – конкретный недостаток разработки, производства, испытаний и (или) эксплуатации объекта, вызвавший его отказ.

Конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации до перехода в состояние, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна (предельное состояние объекта).

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние.

Сокращения

АВПКО – анализ видов, последствий и критичности отказов

АНШС – анализ нештатных ситуаций

АП – автоматизированное проектирование

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БИС – большая интегральная схема

БКУ – бортовой комплекс управления

БРК – бортовой ретрансляционный комплекс

ВЧИ – высокочастотные испытания

ГИ – граничные испытания

ГК – главный конструктор

ГКБ – Головное конструкторское бюро

ГКЛ – галактические космические лучи

ГСО – геостационарная орбита
ДИ – дополнительные испытания
ДНК – диагностический неразрушающий контроль
ЕКА – Европейское космическое агентство
ЕРПЗ – естественный радиационный пояс Земли
ЖЦ – жизненный цикл
ЗЧ – заряженная частица
ИИ – ионизирующее излучение
ИКМ – инженерно-квалификационная модель
ИЛ – испытательная лаборатория
ИМ – инженерная модель
ИС – интегральная схема
ИТЦ – испытательный технический центр
КА – космический аппарат
КД – конструкторская документация
КДИ – конструкторско-доводочные испытания
КИ – комплексные испытания
Ки – комплектующее изделие
КМ – квалификационная модель
КМОП – комплементарная структура металл–оксид–полупроводник
КОИ – комплекс отработочных испытаний
КП – космическое пространство
КПЭО – комплексная программа экспериментальной отработки
КР – карточка разрешения
Кр – коэффициент риска
КРР – карта рабочих режимов
КРРИ – карта регистрации результатов испытаний
КТЭ – конструктивно-технологический инструмент
КУ – конструктивный узел
ЛИ – лётные испытания
Ли – лётное изделие (модель)
ЛОИ – лабораторные отработочные испытания
ЛМ – лабораторная модель
ЛПЭ – линейная потеря энергии
НД – нормативная документация
НКУ – наземный комплекс управления
НЭО – наземная экспериментальная отработка
ОАО «ГКС» – ОАО «Газпром космические системы»
ОИ – отбраковочные испытания
ПД – проектная документация
ПДСЕ – перечень документов на сборочную единицу
ПЗ – пояснительная записка
ПИ – периодические испытания

ПМ – протолётная модель
ПН – показатель надежности
Пн – полезная нагрузка
ПО – программное обеспечение
ПОБ – программа обеспечения безопасности
ПОН – программа обеспечения надежности
ПП – полупроводниковый прибор
ПРП – протокол разрешения применения
При – предъявительские испытания
ПСИ – приемосдаточные испытания
ПХО – плазмохимическая обработка
РД – рабочая документация
РИ – ресурсные испытания
РКД – рабочая конструкторская документация
РФА – разрушающий физический анализ
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
РЭС – радиоэлектронное средство
САО – система анализа отказов
САПР – система автоматизированного проектирования
САФ – срок активного функционирования
СБИС – сверхбольшая интегральная система
СКЛ – солнечные космические лучи
СОС – система ориентации и стабилизации
СПИ – специальные испытания
ССН – структурная схема надежности
СТР – система терморегулирования
СЧ – составная часть
СЭС – система электроснабжения
ТД – технологическая документация
ТЗ – техническое задание
ТЗЧ – тяжелая заряженная частица
ТИ – типовые испытания
ТКК – точка контроля ключевая
ТКО – точка контроля обязательная (MIP)
ТР – техническое решение
ТТ – технологическая тренировка
ТУ – технические условия
ТЭЗ – типовой элемент замены
ФСС КТ – Федеральная система сертификации космической техники
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЭД – эксплуатационная документация
ЭКБ – электронная компонентная база
ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭП – электроперегрузки
ЭПр – эскизный проект
ЭРИ – электрорадиоизделие
ЭРИ ИП – электрорадиоизделие иностранного производства
ЭРИ ОП – электрорадиоизделие отечественного производства
ЭРЭ – электрорадиоэлемент
ЭСР – электростатический разряд
ЭТТ – электротермотренировка
ЭХ – электрическая характеристика
CDR – критическое рассмотрение проекта
CRR – заключительная приёмка космического аппарата на заводе-изготовителе
DRB – рассмотрение готовности к поставке
EQSR – рассмотрение состояния квалификации оборудования
LRR – рассмотрение готовности к запуску
LQR – рассмотрение результатов лётных испытаний
FMCR – рассмотрение завершения изготовления лётного изделия
FQR – заключительная приемка КА на орбите
MRR – рассмотрение готовности к изготовлению
PDR – предварительное рассмотрение проекта
RFD – отказ от требований документации
RFW – отклонение от требований документации
SRR – рассмотрение системных требований
TRB – рассмотрение результатов испытаний
TRR – рассмотрение готовности к испытаниям

Приложение Б
ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ (EQSR)

Цель рассмотрения: определение квалификационной категории оборудования и объемов необходимых работ по подтверждению пригодности оборудования к применению на создаваемом КА.

Таблица Б.1

Содержание работы	Анализируемая документация
<p>1. Рассмотрение презентации исполнителей о состоянии с квалификацией оборудования, содержащей предложения и обоснования его квалификационного статуса и перечня работ по подтверждению пригодности к использованию оборудования в составе КА</p> <p>2. Анализ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – изменений, внесенных в документацию на оборудование по отношению к квалифицированному прототипу; – схемно-конструктивных изменений оборудования и изменений технологии; – перечня зафиксированных отступлений от требований ТЗ (спецификации); – интерфейсов; – матрицы соответствия ТЗ (спецификации) <p>3. Анализ соответствия модели эксплуатации оборудования, применительно к которой проведена его квалификация, требованиям модели эксплуатации изделия</p> <p>4. Анализ соответствия требований к качеству и надежности оборудования, методам их обеспечения и подтверждения контракту</p> <p>5. Анализ доказательной документации по подтверждению соответствия оборудования требованиям по квалификации</p>	<p>ТУ на оборудование. Протокол разрешения применения (ПРП). Данные о результатах квалификации оборудования-прототипа. Презентация предприятия-поставщика оборудования</p> <p>Чертежи и принципиальные электрические схемы на рассматриваемое оборудование и квалифицированные прототипы. Матрица соответствия оборудования требованиям ТЗ (спецификации)</p> <p>Матрица соответствия оборудования. ТУ на оборудование. Протокол разрешения применения (ПРП) ТЗ на разработку оборудования (спецификация). ТУ на оборудование. Протокол разрешения применения (ПРП)</p> <p>ПОН и отчет о ее выполнении; АВПКО. План и отчет о результатах контроля критичных элементов. Отчеты по анализам: – надежности; – нагрузок комплекующих ЭРИ;</p>

Содержание работы	Анализируемая документация
	<ul style="list-style-type: none"> - радиационной стойкости; - тепловых нагрузок (тепловой расчет). <p>КПО и отчет о ее выполнении.</p> <p>Программы-методики и отчетные документы по результатам всех видов испытаний:</p> <ul style="list-style-type: none"> - отработочных (в том числе ресурсных, радиационных, стыковочных, по контролю интерфейсов и комплексов); - приемочных (в т.ч. приемосдаточных)
6. Анализ результатов работ по обеспечению правильности применения комплектующих ЭРИ	<p>Карты рабочих режимов ЭРИ.</p> <p>Протоколы разрешения применения ЭРИ.</p> <p>Ограничительные перечни ЭРИ.</p> <p>Требования по допустимым коэффициентам нагрузок.</p> <p>Техническое описание, протоколы стыковки для оборудования.</p> <p>Электрические схемы оборудования</p>
7. Анализ установленного порядка закупки, дополнительных испытаний и поставки ЭРИ отечественного и иностранного производства для комплектации электронного и радиоэлектронного оборудования, обеспечения прослеживаемости ЭРИ.	<p>Требования к комплектуем ЭРИ, применяемым в оборудовании.</p> <p>Положение о порядке комплектации оборудования.</p> <p>Договор с испытательным техническим центром о дополнительных испытаниях ЭРИ. Программа испытаний.</p> <p>Сертификаты на ЭРИ ИП.</p> <p>Положение о прослеживаемости ЭРИ</p>
8. Анализ документации на ЭРИ собственного изготовления, полноты конструктивно-технологической отработки, состава и результатов испытаний	<p>ТУ на ЭРИ собственного изготовления.</p> <p>Программы-методики и результаты испытаний ЭРИ собственного изготовления на этапе отработки.</p> <p>Результаты периодических и приемосдаточных испытаний ЭРИ собственного изготовления</p>
9. Анализ перечней особо ответственных (критичных) технологических операций (процессов) изготовления оборудования, точек обязательного контроля в процессе изготовления	<p>Перечни особо ответственных (критичных) технологических процессов (операций) изготовления оборудования</p>
10. Анализ состояния с контролем (сохранением) конфигурации оборудования	<p>Перечень проведенных изменений конструкторской документации.</p> <p>Отчетные материалы с подтверждением обоснованности проведенных изменений в части сохранения уровня безотказности и долговечности</p>

Содержание работы	Анализируемая документация
11. Анализ данных о кооперации предприятий, участвующих в создании оборудования, и установленного порядка обеспечения качества продукции и услуг, предоставляемых по кооперации	Перечень предприятий-субподрядчиков, поставляющих составные части оборудования. Сертификаты на систему качества предприятий-субподрядчиков. Документы, подтверждающие выполнение требований ТУ на оборудование поставщиками его составных частей
12. Анализ данных об опыте эксплуатации оборудования: – количество выпущенных образцов оборудования; – разработка при испытаниях и эксплуатации (раздельно); – наличие замечаний, перечень мероприятий по их устранению и предотвращению замечаний	Обобщенные материалы предприятия-поставщика оборудования. Перечень комплектующих, по которым зафиксированы отказы при испытаниях и эксплуатации оборудования. Результаты рассмотрения причин отказов (замечаний)
13. Проверка наличия сертификата на систему менеджмента качества предприятия и системы документов, отражающих требования по обеспечению качества оборудования, применяемых компонентов и материалов	Сертификаты качества. Руководящие документы системы менеджмента качества
14. Рассмотрение эффективности действующей на предприятии системы контроля качества продукции, ведения рекламационной работы с поставщиками	Стандарты предприятия по вопросам контроля качества производства, учета и анализа брака, комплектующих, ЭРИ и материалов. Текущая документация по контролю качества продукции (планы, протоколы, акты, журналы и т.п.)
15. Оценка полноты конструкторской и технологической документации, ее достаточности для изготовления оборудования	Перечни КД и ТД. Решение о присвоении литеры КД. Заключения о технологичности
16. Оценка состояния производственной и испытательной базы предприятия	Наличие и готовность необходимого испытательного оборудования для проведения работ по квалификации оборудования для КА. Паспорта на технологическое и испытательное оборудование. Протоколы аттестации
17. Принятие решения по категории квалификации оборудования и разработка предложений по дополнительным анализам и испытаниям оборудования (при необходимости)	Результаты работы комиссии

Приложение В
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАССМОТРЕНИЮ КВАЛИФИКАЦИИ
ОБОРУДОВАНИЯ КА

Таблица В.1

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
<p>1. Получение исходной информации о рассматриваемом оборудовании и предложения поставщика о его квалификационном статусе</p>	<p>Рассмотрению подлежат в первую очередь ТУ на оборудование, ТЗ на его разработку и другие документы, содержащие исходные данные по оборудованию. Из представленных материалов необходимо получить полную информацию о выполняемых оборудованьем функциях, принципе действия, принятых конструкторских решениях, основной элементной базе, примененных методах обеспечения надежности и радиационной стойкости (резервирование, экранирование и т.п.). Необходимо выявить критичные элементы оборудования (нестандартные элементы и технологические процессы), а также точки единичного отказа с тем, чтобы принять необходимые меры по снижению уровня их критичности. Предложение поставщика о квалификационном статусе оборудования необходимо принять к сведению, исходя из положения, что установление статуса оборудования – прерогатива заказчика</p>
<p>2. Анализ соответствия модели эксплуатации оборудования, применительно к которой проведена его квалификация, требованиям модели эксплуатации в составе рассматриваемого КА</p>	<p>Необходимо провести сопоставление по всему комплексу внешних воздействующих факторов на оборудование, по отношению к которым проведена квалификация, видам и уровням внешних факторов, стойкость к воздействию которых должна быть подтверждена для оборудования рассматриваемого КА. В модель эксплуатации оборудования необходимо также включать режимы работы оборудования и требования к его надежности и проводить сравнение по всем этим характеристикам</p>
<p>3. Анализ соответствия требований к качеству и надежности оборудования, методам их обеспечения и подтверждения контракту</p>	<p>Необходимо убедиться в том, что в ТЗ, ТУ (или в спецификации) на оборудование требования к испытаниям и анализам, выполняемым с целью подтверждения его квалификации, устанавливались не ниже требований контрактных документов на создаваемый объект (ТЗ на КА, «Требования по квалификации и приемке», «Гарантии качества продукции» и т.п.). В результате проведенного анализа должен быть сделан вывод о соответствии объема и видов анализов и испытаний, установленных в ТЗ и ТУ на оборудование, требованиям контракта на создание КА или разработаны поручения по устранению выявленных несоответствий (путем проведения дополнительных испытаний и анализов)</p>
<p>4. Анализ доказательной документации по подтверждению соответствия оборудования требованиям по квалификации</p>	<p>Проверке подлежат: – ПОН и отчеты о ее выполнении; – отчет по АВПКО;</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<ul style="list-style-type: none"> – план контроля критичных элементов и отчет о его выполнении; – отчеты по анализам (надежности, ресурса и сохраняемости, нагрузок комплекующих, радиационной стойкости, тепловой, механический). <p>ПОН проверяется в первую очередь в части соответствия запланированных мероприятий требованиям контрактных документов («Требования по квалификации и приемке» и «Гарантии качества продукции»); АВПКО – в части учета всех возможных видов отказов и полноты сформированного перечня критичных элементов; план контроля критичных элементов – в части охвата контролем и мероприятиями критичных элементов на максимально возможном числе этапов их создания и применения; отчеты по анализам – в части корректности принятых допущений, достоверности исходных данных и соответствия полученных выводов контрактным требованиям</p>
<p>5. Анализ полноты и эффективности мероприятий по исключению (снижению уровня критичности) критичных элементов</p>	<p>При углубленном анализе мероприятий по устранению критичных элементов (снижению уровня критичности) в рассматриваемом оборудовании необходимо выделять 2 вида критичных элементов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – элементы, являющиеся «точками единичного отказа», к которым относят элементы, отказ которых приводит к потере работоспособности оборудования; – элементы, характеризующиеся повышенным риском отказа вследствие их пониженной надежности (по отношению к другим примененным элементам), нестандартные элементы (ЭРИ собственного изготовления) и нестандартизованные операции технологического процесса. <p>В результате проведенного анализа должен быть сделан вывод о достаточности (недостаточности) принятых мер по исключению (снижению уровня критичности) критичных элементов и, при необходимости, разработаны поручения по проведению дополнительных мероприятий</p> <p>Целью данного анализа на этапе проверки квалификации оборудования является оценка ответственности проведенных работ по обеспечению правильности применения ЭРИ требованиями контракта на создание рассматриваемого КА.</p> <p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ведомости примененных в оборудовании ЭРИ; – ограничительные перечни ЭРИ, разрешенных для применения в оборудовании для рассматриваемого КА; – карты рабочих режимов ЭРИ; – протоколы разрешения применения ЭРИ; – требования по допустимым коэффициентам нагрузок; – техническое описание, протоколы стыковки для оборудования; – электрические схемы оборудования.
<p>6. Анализ результатов работ по обеспечению правильности применения комплекующих ЭРИ</p>	

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
<p>7. Анализ установленного порядка закупки, дополнительных испытаний и поставки ЭРИ отечественного и иностранного производства для комплектации электротехнического и радиоэлектронного оборудования, обеспечения прослеживаемости ЭРИ</p>	<p>В результате проведенного анализа должны быть разработаны поручения об устранении выявленных несоответствий</p> <p>Целью данного анализа является оценка соответствия принятого порядка обеспечения комплектации оборудования высококачественными комплектующими ЭРИ требованиям контракта на создание рассматриваемого КА.</p> <p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – требования к качеству комплектующих ЭРИ, применяемых в рассматриваемом оборудовании; – программа дополнительных испытаний ЭРИ в испытательных технических центрах (ИТЦ); – договор с испытательным техническим центром о дополнительных испытаниях ЭРИ, программа испытаний; – сертификаты на ЭРИ иностранного производства (сертификаты, выданные предприятиями поставщиками ЭРИ, и сертификаты соответствия в системе ФСС КТ); – стандарты и положения, устанавливающие порядок обеспечения прослеживаемости ЭРИ. <p>В результате проведенного анализа должны быть разработаны поручения об устранении выявленных несоответствий</p>
<p>8. Анализ документации на ЭРИ собственного изготовления, полноты конструктивно-технологической отработки, состава и результатов испытаний, в том числе под контролем ВП МО РФ</p>	<p>Целью анализа является проверка соответствия качества ЭРИ собственного изготовления требованиям контракта.</p> <p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ТУ на ЭРИ собственного изготовления (проверяется наличие согласования с ВП МО РФ на предприятии, соответствие формы ТУ требованиям ГОСТ РВ 20.39.415–97 в части наличия разделов «Требования к надежности», «Требования к обеспечению качества», «Правила приемки» и «Методы контроля»); – программы-методики и результаты испытаний ЭРИ собственного изготовления на этапе отработки (квалификации); – программы-методики и результаты периодических и приемосдаточных испытаний ЭРИ собственного изготовления. <p>В результате проведенного анализа должно быть подтверждено, что ЭРИ собственного изготовления по своим технико-эксплуатационным характеристикам (прежде всего по ресурсу) соответствуют требованиям, предъявляемым к ЭРИ для рассматриваемого КА, или должны быть разработаны поручения по устранению выявленных несоответствий</p>
<p>9. Анализ перечней особо ответственных технологических операций (процессов) изготовления оборудования, точек обязательного контроля в процессе изготовления</p>	<p>Целью данного анализа является проверка соответствия принятого порядка обеспечения качества изготовления оборудования требованиям основополагающих НД (Положение РК-11-КТ и др.).</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<p>Перечень особо ответственных операций изготовления оборудования должен дополняться списком исполнителей, аттестованных на их выполнение.</p> <p>Точки контроля обязательного (ТКО) должны обеспечивать уверенность в том, что предстоящие операции изготовления рассматриваемой сборочной единицы оборудования выполнены в полном соответствии с требованиями технологической документации и КД.</p> <p>При рассмотрении перечня ТКО необходимо проверить, что в него включены все сборочные единицы оборудования</p>
10. Анализ состояния с контролем (сохранением) конфигурации оборудования	<p>Анализу подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень проведенных изменений конструкторской и технологической документации; – отчетные материалы с подтверждением обоснованности проведенных изменений в части сохранения уровня безотказности и долговечности рассматриваемого оборудования
11. Анализ данных о кооперации предприятий, участвующих в создании оборудования, и установленного порядка обеспечения качества продукции и услуг, предоставляемых по кооперации	<p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень составных частей оборудования, поставляемых по кооперации; – перечень субподрядчиков составных частей оборудования; – сертификаты на систему качества субподрядчиков; – документы, подтверждающие выполнение требований ТУ на оборудование поставщиками его составных частей
12. Анализ данных об опыте эксплуатации оборудования	<p>При анализе необходимо использовать информацию о:</p> <ul style="list-style-type: none"> – количестве выпущенных образцов оборудования; – наработке оборудования при испытаниях и эксплуатации (раздельно); – наличии замечаний по результатам испытаний и эксплуатации (раздельно); – установленных причинах замечаний; – проведенных мероприятиях по устранению и предотвращению замечаний и их эффективности. <p>В отдельный раздел рассмотрения целесообразно отнести:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень комплектующих ЭРИ, по которым зафиксированы отказы при испытаниях и эксплуатации оборудования; – результаты рассмотрения причин отказов комплектующих ЭРИ; – проведенные мероприятия по устранению и предотвращению замечаний к ЭРИ и их эффективность
13. Проверка наличия сертификата на систему менеджмента качества предприятия и системы документов, отражающих требования по обеспечению качества оборудования, применяемых компонентов и материалов	<p>Проверке подлежат имеющиеся на предприятии-поставщике оборудования сертификаты на систему качества. При этом необходимо проверить срок действия сертификата и перечень видов продукции предприятия, на которые распространяется сертификат (перечень является обязательным приложением к сертификату).</p> <p>В протоколе рассмотрения необходимо зафиксировать организацию, выдавшую сертификат (орган по сертификации)</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
<p>14. Рассмотрение эффективности действующей на предприятии системы контроля качества продукции</p>	<p>Анализируются стандарты предприятия по вопросам контроля качества продукции, учета и анализа брака, ведению рекламационной работы с поставщиками комплектующих, ЭРИ и материалов, а также текущая документация по контролю качества продукции (планы, протоколы, акты, журналы и т.п.). Анализ проводится с целью выявления и устранения отступлений от соответствующих требований контракта и основополагающих нормативных документов (ГОСТ и ОСТ)</p>
<p>15. Принятие решения по категории квалификации оборудования и разработка предложений по дополнительному анализу и испытаниям оборудования (при необходимости). Разработка исходных данных для составления развернутой программы контроля качества оборудования на этапах его доработки, изготовления и испытаний</p>	<p>На основе выполненных рассмотрений заказчиком устанавливается квалификационный статус оборудования (А, В, С или D). Подчеркнем, что поставщик оборудования готовит предложение для вывода о категории квалификации оборудования, а решение по этому вопросу должен принимать заказчик. С учетом решения о категории квалификации оборудования планируются (уточняются принятые ранее) виды испытаний при наземной экспериментальной отработке, а также программы рассмотрений на этапах выполнения проекта</p>

Приложение Г
ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СИСТЕМ

Цель рассмотрения: определение квалификационной категории бортовых систем КА и объемов необходимых работ по подтверждению пригодности систем к применению на создаваемом КА.

Таблица Г.1

Содержание работы	Анализируемая документация
1. Анализ соответствия требований спецификации системы требованиям контракта	Спецификация на систему (ТЗ). Таблица соответствия требованиям ТЗ. Презентация разработчика
2. Определение прототипа системы. Анализ отличий системы от прототипа, в том числе: – анализ отличий функциональных схем и интерфейсов системы и прототипа; – сравнение режимов работы, логики функционирования, ПО системы и прототипа; – сравнение категорий квалификации оборудования системы и прототипа	Эскизный проект. Перечень элементов системы. Схема электрическая общая (пневматическая, гидравлическая). Схема электрическая принципиальная. Протоколы стыковки. Логика функционирования системы (в т.ч. НПС). Архитектурный проект ПО (ПЗ на ПО). Протоколы EQR оборудования системы. Результаты НЭО прототипа. Презентация разработчика
3. Анализ доказательной документации по подтверждению соответствия системы требованиям по квалификации. Анализ полноты и эффективности мероприятий по исключению (снижению уровня критичности) критичных элементов. Анализ замечаний к системам-прототипам, зафиксированных при их испытаниях и эксплуатации	ПОН. АВПК. План и отчет о результатах контроля критичных элементов. Анализ надежности. Обобщенные материалы предприятий-поставщиков по оборудованию, по которому зафиксированы отказы при испытаниях и эксплуатации. Результаты рассмотрения причин отказов (замечаний)
4. Анализ плана квалификации системы, включая перечень испытаний для квалификации изменений интерфейсов и ПО, в части достаточности для подтверждения соответствия системы требованиям спецификации (ТЗ)	План квалификации системы (КПЭО)

Содержание работы	Анализируемая документация
<p>5. Анализ состояния с выпуском организационных документов, регламентирующих процесс создания и обработки системы и устанавливающих ответственных исполнителей.</p> <p>Анализ данных о кооперации предприятий, участвующих в создании оборудования, и установленного порядка обеспечения качества продукции и услуг, представляемых по кооперации</p>	<p>Организационный приказ. График работ. Перечень предприятий-субподрядчиков, поставляющих оборудование для систем. Сертификаты на систему качества предприятий-субподрядчиков. Документы, подтверждающие соответствие оборудования требованиям спецификации (ТЗ, ТУ) на систему</p>

Приложение Д
ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАССМОТРЕНИЯ ПРОЕКТА (PDR)

Цель рассмотрения: оценка концепции построения, реализуемости и соответствия ожидаемых характеристик создаваемых КА, их СЧ, подсистем и оборудования требованиям контракта, конкретизация планов их проектирования, разработки, изготовления и испытаний.

Т а б л и ц а Д.1

Содержание работы	Анализируемая документация
1. Проверка полноты разработанной и предъявленной заказчику документации и материалов эскизного проекта	Ведомость эскизного проекта. Пояснительная записка
2. Анализ общей конфигурации КА, систем, приборов, их внешней и внутренней компоновки, функциональных и электрических схем СЧ и доказательных материалов, подтверждающих соответствие принятых проектных решений требованиям контракта	Чертеж общего вида, теоретический и габаритный чертежи. Схемы деления структурных КА и составных частей. Схемы функциональная и электрическая общая (пневматическая, гидравлическая). Схема электрическая принципиальная. Логика функционирования систем
3. Проверка соответствия интерфейсов КА и бортовых систем интерфейсам средств выведения и НКУ, анализ необходимых мероприятий по адаптации	Пояснительная записка. Программа полета. Таблицы соединений и кроссировок. Протоколы стыковки
4. Проверка полноты выпущенных ТЗ (спецификаций), протоколов решения применения (ПРП) на составные части, бортовые системы и оборудование, анализ соответствия их содержания требованиям контракта	Спецификации (ТЗ). Протоколы разрешения применения. Приложение к контракту на создание КА «Требования по квалификации и приемке». Приложение к контракту на создание КА «Техническое задание (спецификация)»
5. Анализ планов разработки и отработки программного обеспечения (ПО) на уровне оборудования, подсистем и КА в целом, включая проверку идентичности используемых при отработке ПО моделей (имитаторов) фактическим характеристикам объектов КА	Архитектурный проект ПО (ПЗ на ПО)

Содержание работы	Анализируемая документация
6. Анализ предложений по программам экспериментальной отработки оборудования, бортовых систем и КА, программ-методик и имеющихся результатов экспериментального подтверждения соответствия оборудования и бортовых систем требованиям по квалификации	<p>Пояснительная записка. Проект КПЭО. Перечень методик проведения наземных и лётных испытаний и методик оценки их результатов. Протоколы с результатами рассмотрения квалификации оборудования и бортовых систем КА</p>
7. Анализ обоснования условий эксплуатации КА, систем, приборов на различных этапах наземной подготовки и лётной эксплуатации	<p>Модель внешних воздействующих факторов на КА</p>
8. Проверка полноты и содержания проектных расчетов и анализов	<p>Механический расчет. Тепловой расчет. Радиационный анализ. Расчет внешних нагрузок. Расчет аэродинамический. Расчет баллистический. Расчеты и анализы надежности, включая АВПКО. Анализы ЭМС и стойкости к ЭСР. Анализы процессов раскрытия солнечных батарей и антенн. Анализ точности ориентации КА и т.д.</p>
9. Анализ проектов перечней комплектующих ЭРИ и материалов, разрешенных к применению в КА	<p>Перечень ЭРИ, перечень материалов</p>
10. Анализ бюджетов для всех режимов эксплуатации с учетом деградации характеристик	<p>Расчет масс, центра масс, моментов инерции. Расчет энергетического баланса. Баланс запасов топлива ДУ. Энергетики полезной нагрузки и командной радиополинии. Погрешности ориентации антенн полезной нагрузки и т.д.</p>
11. Анализ программы полета КА, включая основные сведения по порядку проведения ЛИ	<p>Программа полета КА. Основные положения программы ЛИ</p>
12. Анализ нештатных ситуаций в оборудовании и бортовых системах КА, мероприятия по выходу из НШС	<p>Перечень НШС. Анализ нештатных ситуаций на уровне КА и бортовых систем</p>
13. Анализ предложений по выпуску эксплуатационной документации	<p>Перечень эксплуатационной документации. Технические условия. Руководства по эксплуатации</p>

Содержание работы	Анализируемая документация
14. Проверка полноты и содержаний: – заключения головного подрядчика на эскизные проекты составных частей КА; – заключения на ЭПр КА, выданного уполномоченной головной организацией Роскосмоса	Заключение головного подрядчика на ЭПр составных частей КА. Заключение на ЭПр КА, выданное уполномоченным головным предприятием отрасли
15. Анализ матрицы соответствия результатов эскизного проекта КА контрактным требованиям	Матрица соответствия

**ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ
К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ (MRR)**

Цель рассматривания: проверка способности предприятия к изготовлению оборудования с уровнем качества, соответствующим требованиям контракта на создание КА.

Таблица Е.1

Содержание работы	Объект анализа
1. Анализ готовности КД	
1.1. Рассмотрение состава КД и оценка ее достаточности для запуска производства оборудования	Справка Главного конструктора (ГК). Акт передачи (наличия) КД
1.2. Рассмотрение материалов по технологичности изготовления	Заключение (акт) по оценке технологичности
1.3. Анализ данных об объеме и результатах НЭО оборудования	Отчеты по КПЭО и ПОН, справки ГК
1.4. Анализ данных об извещениях по изменениям КД и ТД на заимствуемые образцы оборудования и рассмотрение материалов по обоснованию изменений	Перечень извещений об изменениях КД и ТД. Материалы анализа и (или) протоколы испытаний, подтверждающие обоснованность проведенных изменений
1.5. Проверка термозлектрических режимов работы (проводится при проверке непосредственной готовности к изготовлению летной аппаратуры контролируемого проекта)	ТУ и ПРП на комплектующие. Ведомости покупных и разрешенных к применению. Перечень ЭРИ, разрешенных для применения. Карты рабочих режимов (КРР) ЭРИ. Заключение с результатами проверки правильности применения комплектующих ЭРИ
2. Анализ технологии и процесса изготовления оборудования	
2.1. Проверка наличия и хода выполнения плана подготовки производства к изготовлению оборудования	План подготовки производства, акты готовности
2.2. Анализ состава технологической документации, оценка ее достаточности для изготовления и контроля качества оборудования, анализ порядка внесенных изменений в ТД	Перечень ТД, по которой ведется изготовление. Перечень особо ответственных операций. Стандарт предприятия по порядку внесения изменений в ТД
2.3. Анализ состояния с аттестацией рабочих мест и исполнителей	Протоколы аттестационных комиссий, свидетельства об аттестации исполнителей. Удостоверения на выполнение особо ответственных операций

Содержание работы	Объект анализа
2.4. Проверка условий хранения и процессов монтажа ЭРИ в аппаратуру	Журналы контроля условий в производственных помещениях и на складах хранения ЭРИ. Журналы контроля антистатических браслетов, заземлений и т.п. Паспорта на штампы формовки выводов ЭРИ и протоколы их аттестации
2.5. Оценка принятого порядка прослеживаемости ЭРИ и его ответственности требованиям контракта	Положение (СТП или инструкция) о прослеживаемости ЭРИ
2.6. Рассмотрение порядка учёта и анализа брака, неисправностей и отказов, выявленных в процессе изготовления и испытаний аппаратуры, порядка ведения рекламационной работы и информирования заказчика об отказах ЭРИ	Журналы регистрации выявленных несоответствий. Журналы учета полученных и предьявленных рекламаций
2.7. Оценка состояния с выполнением требований ТД на рабочих местах	Материалы планового и летучего контроля со стороны ОГК
2.8. Контроль достаточности испытательной базы для отработки и испытаний аппаратуры и ее аттестация	ТУ, ТЗ, протоколы аттестации
2.9. Рассмотрение системы предьявительских (ПРИ) и приёмодаточных испытаний (ПСИ) оборудования, в т.ч. на соответствие требованиям контракта, их обеспеченности контрольно-проверочной аппаратурой и контрольно-измерительными приборами	Программы и методики при ПСИ, ТУ

Приложение Ж
**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАССМОТРЕНИЮ ГОТОВНОСТИ
 К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ**

Таблица Ж.1

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
<p>1. Анализ готовности КД к изготовлению оборудования</p> <p>1.1. Рассмотрение состава КД и оценка ее достаточности для запуска производства оборудования</p>	<p>Необходимо потребовать представление:</p> <ul style="list-style-type: none"> – справки Главного конструктора о завершении разработки КД; – акта передачи КД на архивное хранение. <p>Эти документы должны быть включены в состав приложений протокола проверки.</p> <p>Рассмотрение данных документов проводится для проверки их соответствия требованиям ТЗ.</p> <p>В справке Главного конструктора необходима запись о том, что КД проверена в производстве технологических и опытных образцов (образцов для НЭО), а также при их испытаниях.</p> <p>Необходимо получить перечень документов на сборочные единицы (ПДСЕ) и провести их рассмотрение в части полноты и соответствия схеме деления проверяемого оборудования</p> <p>Заключение (акт) по оценке технологичности должно по содержанию и оформлению соответствовать стандарту предприятия и содержать подтверждение отсутствия необходимости применения при изготовлении оборудования нестандартизованных (неквалифицированных) технологических процессов. В противном случае необходимо дать поручение о составлении программы и проведении квалификации технологии изготовления оборудования.</p> <p>Полнота ТД должна обеспечивать изготовление всех деталей и сборочных единиц оборудования.</p>
<p>1.2. Рассмотрение материалов по оценке технологичности изготовления</p>	<p>Особого внимания при рассмотрении требуют используемые процессы изготовления, на которые отсутствует стандартизованная отраслевая документация. Такие процессы (которые должны быть включены в перечень критичных элементов, разрабатываемый на проектно этапе разработки оборудования или на этапе выпуска рабочей документации) целесообразно подвергнуть независимой экспертизе и аттестации</p>
<p>1.3. Анализ данных об объеме и результатах наземной экспериментальной отработки оборудования</p>	<p>При данном анализе рассматриваются отчеты по НЭО и ПОН. Необходимо убедиться в полноте выполнения данных программ. При рассмотрении матрицы соответствия подтвержденных при НЭО параметров и характеристик оборудования требованиям ТЗ целесообразно провести также их сопоставление с требованиями контракта на КА.</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<p>Необходимо провести анализ полноты и достоверности проведенных исследований причин несоответствий (отказов, неисправностей, замечаний), зафиксированных при НЭО, и убедиться в том, что приняты исчерпывающие меры для их исключения в штатном образце оборудования.</p> <p>Необходимо рассмотреть акты проверки КД на соответствие ГОСТ 2.902–68 для присвоения литеры «О» или «О1».</p> <p>На данном этапе работы целесообразно уточнить разделы паспорта квалификации оборудования, отражающие проектные анализы и работы по наземной экспериментальной отработке</p>
<p>1.4. Анализ данных об извещениях по изменениям КД и ТД на заимствуемые образцы оборудования и рассмотрение материалов об обоснованно изменениях</p>	<p>Данный анализ проводится для того, чтобы убедиться, что проведенные после квалификации изменения КД и ТД не снизили уровень качества оборудования. Анализу подлежат все проведенные изменения, содержащиеся в перечнях извещений об изменении КД и ТД.</p> <p>Необходимо рассмотреть показательные материалы, подтверждающие сохранение квалификации оборудования после проведения корректировок, обращающая особое внимание на соответствие примененных методов подтверждения квалификации оборудования после доработок требованиям контракта на создание КА</p>
<p>1.5. Проверка термозлектрических режимов работы ЭРИ</p>	<p>Данную работу необходимо проводить с использованием рекомендаций, содержащихся в соответствующем прил. М настоящего учебного пособия</p>
<p>2. Анализ технологии и процесса изготовления оборудования</p>	
<p>2.1. Проверка наличия и хода выполнения плана подготовки производства к изготовлению оборудования</p>	<p>Рассмотрению подлежат планы подготовки производства и акты готовности, оформленные предприятием</p>
<p>2.2. Анализ состава технологической документации, оценка ее достаточности для изготовления и контроля качества аппаратуры, анализ порядка внесенных изменений в ТД</p>	<p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень технологической документации, по которой ведется изготовление оборудования и его составных частей; – перечень особо ответственных операций технологического процесса; – стандарт предприятия по порядку внесения изменений в ТД. <p>Необходимо убедиться в том, что перечень особо ответственных операций содержит указание на тип аппаратуры, на который он распространяется. Перечень должен быть согласован с ОТК</p>
<p>2.3. Анализ состояния с аттестацией рабочих мест и исполнителей</p>	<p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – протоколы аттестационных комиссий; – свидетельства об аттестации исполнителей; – удостоверения на выполнение особо ответственных операций. <p>Необходимо убедиться в том, что технологические операции, отнесенные к перечню особо ответственных, выполняются исполнителями, аттестованными на право их выполнения.</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<p>Необходимым условием недопущения недостатков при монтаже ЭРИ является обеспечение требуемого технического состояния технологического оборудования и оснастки, исключающих возможность повреждения ЭРИ. Основные требования к применяемому оборудованию и оснастке состоят в следующем:</p> <ul style="list-style-type: none"> – оборудование, оснастка и средства измерения должны быть аттестованы в соответствии с действующей на предприятии документацией; – периодичность аттестации должна быть указана в паспортах или отраслевых стандартах и типовых технологических процессах; – данные об аттестации должны быть отмечены в паспортах на аттестуемое оборудование; – оборудование, оснастка и средства измерения должны быть заземлены; – оборудование и оснастка для формовки и обрезки выводов ЭРИ должны обеспечивать: <ul style="list-style-type: none"> • фиксацию и крепление выводов ЭРИ вне зоны, не пригодной для монтажа, для ИС – по ГОСТ 17467–79; • значения растягивающей и изгибающей сил по ГОСТ в 20.39.406–83; • значение динамического растягивающего усилия в выводах ИС в корпусах 401, 14 в момент формовки – по ОСТ П.073.063–84; – оборудование, применяемое для лужения и пайки выводов ЭРИ, должно обеспечивать: <ul style="list-style-type: none"> • контроль и автоматическое поддержание температуры расплавленного припоя и жала паяющего стержня с погрешностью $\pm 10^{\circ}\text{C}$; • контроль времени лужения и пайки; • заданное расстояние от корпуса ЭРИ до зеркала припоя
<p>2.4. Проверка условий хранения и процессов монтажа ЭРИ в аппаратуру</p>	<p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – журналы контроля условий в производственных помещениях и на складах хранения ЭРИ; – журналы контроля состояния антистатических браслетов и заземлений; – паспорта на штампы формовки выводов ЭРИ и протоколы их аттестации; – заземляющие шины, заземляющие кабели заземляемых рабочих мест и стеллажей для хранения ЭРИ и сборочных единиц. <p>Проверка проводится непосредственно в производственных помещениях и на рабочих местах, где осуществляется процесс хранения и монтажа ЭРИ.</p> <p>Необходимо зафиксировать все случаи выполнения работ с ЭРИ в условиях, не соответствующих установленным нормам по температуре, влажности и запыленности (последнее требование распространяется на производство аппаратуры, где применяется элементная база в бескорпусном исполнении). В протокол необходимо включить поручение о разработке и внедрении мероприятий по исключению отступлений.</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
2.5. Оценка принятого порядка обеспечения прослеживаемости ЭРИ и его соответствия требованиям контракта	<p>Особое внимание необходимо уделить проверке выполнения требований по заземлению плат с установленными ЭРИ при их сушке в камере после нанесения лакового покрытия (предотвращение повреждения ЭРИ разрядами статического электричества), а также своевременности и правильности аттестации применяемого при монтаже ЭРИ оборудования и оснастки.</p> <p>При контроле аттестации вибростендов для отмычки плат с ЭРИ необходимо проверить подтверждение их паспортных данных по частоте и амплитуде вибрации, а при рассмотрении протокола аттестации штампов для формовки выводов интегральных микросхем – выполнению требований по усилиям прижима выводов и растягивающих усилий.</p> <p>Необходимо исключить возможность применения некачественных паяльных паст (для установок автоматизированной пайки). Критичными являются условия и продолжительность хранения паяльных паст, а также обоснованность решений о продлении допустимого срока применения паст</p> <p>При данной проверке необходимо рассмотреть действующее на предприятии положение по прослеживаемости (СТП или инструкцию) и провести его сопоставление с требованиями контракта. Необходимо убедиться в том, что на предприятии обеспечена прослеживаемость каждой закупленной партии ЭРИ на всех этапах их контроля, испытаний, а также входного контроля, монтажа и испытаний аппаратуры. Комплексы соответствующих мероприятий должен обеспечить регистрацию сопроводительных документов изготовителя (поставщика) ЭРИ, протоколов всех проводимых испытаний и измерений каждого ЭРИ (от закупки до поставки изделия), регистрации предприятиями-изготовителями аппаратуры схемных позиций, в которые устанавливаются ЭРИ соответствующих партий (при наличии возможностей), хранение в течение установленного срока протоколов испытаний и измерений, журналов и документов, подтверждающих объем проведенных работ с ЭРИ</p>
2.6. Рассмотрение порядка учёта и анализа брака, неисправностей и отказов, выявленных в процессе изготовления и испытаний аппаратуры, порядка ведения рекламационной работы и информирования заказчика об отказах ЭРИ	<p>При данной проверке необходимо рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> – стандарты предприятия, устанавливающие порядок организации и выполнения данных видов работ; – журналы регистрации выявленных несоответствий; – журналы учета полученных и предъявленных рекламаций. <p>Необходимо убедиться в том, что порядок выполнения указанных работ соответствует требованиям основополагающих НД и обеспечивает требования контракта по качеству обслуживания для КА</p>
2.7. Оценка состояния с выполнением требований ТД на рабочих местах	<p>Рассмотрению подлежат материалы планового и летучего контроля состояния технологической дисциплины. При анализе соответствующих журналов следует выявить наиболее часто повторяющиеся недостатки и включить в протокол рассмотрения поручение о принятии эффективных мер по их исключению</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
<p>2.8. Контроль достаточности испытательной базы для отработки и испытаний аппаратуры и ее аттестации</p>	<p>При рассмотрении испытательной базы предприятия необходимо убедиться в наличии оборудования, которое позволяет выполнить в полном объеме все предусмотренные ТЗ виды испытаний (как по характеристикам назначения, так и по технико-эксплуатационным характеристикам). Допускается отдельные виды испытаний проводить на других предприятиях. В этом случае необходимо проверить наличие договора на проведение данного вида испытаний и рассмотреть условия транспортирования оборудования к месту испытаний, получить подтверждение и лично убедиться в соответствии оборудования и условий проведения испытаний заданным требованиям</p>
<p>2.9. Рассмотрение системы при ПСИ оборудования, в т.ч. на соответствие требованиям контракта, их обеспеченности КПА и КИП</p>	<p>Программы и методики предьявительских испытаний (При) и ПСИ, установленные в ТУ на оборудование, должны соответствовать требованиям контракта. Все эти документы должны быть согласованы с генеральным подрядчиком</p>
<p>3. Проверка выполнения поручений</p>	
<p>3.1. Проверка выполнения поручений протоколов EQSR и CDR</p>	<p>При проверке выполнения поручений необходимо получить для рассмотрения весь документальный материал. Как правило, основная часть доказательных материалов должна быть представлена в ОАО «ІКС» до выполнения рассмотрения на предприятиях</p>

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ ИТЦ

Цель рассматривания: проверка способности ИТЦ к проведению дополнительных испытаний ЭРИ в соответствии с «Программой дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА с 15-летним сроком эксплуатации на ГСО».

Т а б л и ц а 3.1

Содержание работы	Анализируемая документация
1. Проверка документов по аккредитации и аттестации ИТЦ (ИЛ)	Аттестаты об аккредитации и свидетельство об аттестации ИТЦ (ИЛ) по системе «Военэлектронсерв» или по системе ФСС КГ, лицензия на осуществление космической деятельности ФКА, сертификат соответствия СМК
2. Проверка обеспеченности ИТЦ (ИЛ) оборудованием и технической документацией, необходимой для поведения испытаний ЭРИ в соответствии с утвержденной «Программой дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА типа «Алмал» с 15-летним сроком эксплуатации на ГСО»	Паспорт ИТЦ (ИЛ)
3. Контроль соблюдения требований по производственной гигиене, аттестации рабочих мест и исполнителей, требований по защите комплекующих ЭРИ на участках их испытаний и хранения от воздействия внешних факторов, включая воздействие разрядов статического электричества	Аттестаты исполнителей, рабочих мест, протоколы об аттестации, журналы контроля температурно-влажностного режима и запыленности, стандарты предприятия в области контроля производственной гигиены, аттестации, защиты ЭРИ от внешних воздействий во время испытаний и хранения
4. Проверка системы обеспечения прослеживаемости ЭРИ, учёта и анализа забракованных ЭРИ, порядка информирования потребителей о результатах испытаний и взаимодействия с поставщиками ЭРИ при выявлении дефектов	Стандарты предприятия по обеспечению прослеживаемости ЭРИ, учёта и анализа забракованных ЭРИ, порядка информирования потребителей о результатах испытаний и взаимодействия с поставщиками ЭРИ при выявлении дефектов
5. Анализ хода выполнения графиков закупок, испытаний и отгрузки комплекующих ЭРИ приборным предприятиям	Договор на испытания ЭРИ отечественного производства и сертификацию ЭРИ иностранного производства
6. Проверка соответствия объёма проведенных испытаний ЭРИ в ИТЦ (ИЛ) требованиям программы и контракта	Программы дополнительных испытаний ЭРИ ИТЦ (ИЛ)
7. Анализ результатов дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ (ИЛ) и обоснованности заключений о соответствии испытанных партий ЭРИ установленным требованиям к качеству	Протоколы РФА, карты регистрации результатов измерений, заключения ИТЦ (ИЛ) по результатам испытаний ЭРИ, отчеты о проведении ИТЦ

Приложение И

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ ГОТОВНОСТИ ИТЦ

Таблица И.1

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
1. Проверка документов по аккредитации и аттестации ИТЦ	<p>При выполнении проверки необходимо убедиться в том, что проверяемый ИТЦ допущен к работе в качестве испытательной лаборатории и в качестве «второго поставщика» электронной компонентной базы (ЭКБ). Как правило, документы по аккредитации оформляются уполномоченными органами: филиал ФГКУ «46 ЦНИИ МО РФ» (орган по сертификации системы «Военэлектронсерв») и ЦСКТ (орган по сертификации системы ФСС КТ).</p> <p>Необходимо потребовать для рассмотрения не только акты аккредитации, но и приложения к ним, в которых определена номенклатура ЭКБ, по которой имеет право выполнять свои функции ИТЦ.</p> <p>Желательно ознакомиться с протоколом (актом) последней из проведенных аттестаций и рассмотреть рекомендации, которые даны данному ИТЦ аттестационной комиссией</p> <p>Данную проверку целесообразно выполнять в 2 этапа.</p> <p>На 1-м этапе рассматриваются перечень оборудования ИТЦ, его технические характеристики, а также имеющаяся техническая документация и их соответствие требованиям программы дополнительных испытаний ЭРИ.</p> <p>На 2-м этапе рассматривается фактическое состояние оборудования (наличие аттестации, поверок и т.д.) и документации (наличие учтенных экземпляров, своевременность корректировок и т.д.)</p>
2. Проверка обеспеченности ИТЦ оборудованием и технической документацией, необходимой для проведения испытаний ЭРИ в соответствии с программой дополнительных испытаний ЭРИ для аппаратуры КА	<p>Первым этапом проверки должно являться рассмотрение договора на закупку, испытания и поставку ЭРИ между предприятием-изготовителем оборудования и ИТЦ. В договоре необходимо проверить соответствие указаний о качестве закупаемых ЭРИ и объеме их испытаний требованиям контракта и согласованной ОАО «ГКС» программы ДИ для аппаратуры КА.</p> <p>Проверке подлежат документы, подтверждающие приобретение ЭРИ у их изготовителей (допускается также приобретение у поставщиков ЭРИ, указанных в приложении к согласованному ОАО «ГКС» «Перечню ЭРИ, допускаемых к применению в аппаратуре КА»). Категории качества закупленных (планируемых к закупке) ЭРИ отечественного и иностранного производства должны также соответствовать «Перечню ЭРИ, допускаемых к применению в аппаратуре КА».</p> <p>При отсутствии возможности приобретения ЭРИ отечественного производства указанной в Перечне категории качества должно быть предьявлено решение об отступлении, согласованное изготовителем оборудования, генеральным подрядчиком и ОАО «ГКС»</p>
3. Проверка документов, подтверждающих выполнение требований к качеству проведенных закупок ЭРИ	

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
4. Анализ хода выполнения графиков закупок, испытаний и отгрузки комплектующих ЭРИ приборным предприятиям	Необходимо убедиться, что график закупок, испытаний и отгрузки комплектующих ЭРИ согласован с изготовителем оборудования, и оценить состояние с его выполнением. Результаты оценки должны быть отражены в протоколе
5. Проверка соответствия объема проведенных испытаний ЭРИ в ИТЦ требованиям программы дополнительных испытаний ЭРИ для аппаратуры КА и контракта	Необходимо убедиться в том, что объем испытаний ЭРИ, предусмотренный технологической документацией ИТЦ, соответствует программе ДИ. При этом должны фиксироваться все отступления от программы как в сторону уменьшения объема испытаний, так и его увеличения. По зафиксированным отступлениям в сторону уменьшения объема испытаний необходимо выдать поручение об устранении несоответствия. По зафиксированным отступлениям в сторону увеличения объема испытаний необходимо получить техническое обоснование его целесообразности, согласованное с генеральным подрядчиком
6. Анализ результатов дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ и обоснованности заключений о соответствии испытанных партий ЭРИ установленным требованиям к качеству	Необходимо убедиться в достоверности выводов заключения ИТЦ о соответствии испытанных партий ЭРИ установленным требованиям к качеству. Это достигается проверкой первичных документов по испытаниям ЭРИ (карт регистрации результатов испытаний – КРРИ), проверкой наличия подписей ОТК на итоговых документах по результатам испытаний (заключение) и непосредственным анализом результатов испытаний требованиям программы (в части выполнения требований по допустимому проценту отбраковки ЭРИ). Особое внимание необходимо уделить проверке подтверждения выполнения выборочного разрушающего физического анализа (РФА) ЭРИ. Применительно к РФА необходимо проверить место проведения РФА (не допускается проведение РФА на предприятии-поставщике ЭРИ), программу РФА и объем выборки, подтвержденной РФА (на соответствие программе ДИ)
7. Контроль соблюдения требований по производственной гигиене, аттестации рабочих мест и исполнителей, требований по защите комплектующих ЭРИ на участках их испытаний и хранения от воздействия внешних факторов, включая воздействие разрядов статического электричества	Проверка должна включать в себя анализ документацию ИТЦ, регламентирующей требования по рассматриваемым вопросам и непосредственную проверку выполнения требований в производственных помещениях и на рабочих местах. Особое внимание – местам хранения и испытаний ЭРИ. Проверке подлежат условия внешней среды (температура и влажность, запыленность – для участков, где выполняются работы по РФА или работа с бескорпусной элементной базой), а также полнота принятых мер по исключению воздействия на ЭРИ разрядов статического электричества
8. Проверка функционирования системы обеспечения прослеживаемости ЭРИ, учёта и анализа забракованных ЭРИ, порядка информирования потребителей о результатах испытаний и взаимодействия с поставщиками ЭРИ при выявлении дефектов	Проверка включает в себя рассмотрение стандартов ИТЦ по рассматриваемым вопросам (на соответствие требованиям основополагающих НД), а также контроль результатов проведения рекламационной работы и работы по информированию поставщиков и потребителей ЭРИ, поставляемых ИТЦ

**ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭРИ В ИТЦ**

Цель рассматривания: проверка соответствия ЭРИ, отобранных для комплектования бортовой аппаратуры КА, требованиям утвержденной «Программы дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ».

Т а б л и ц а К.1

Содержание работы	Анализируемая документация
1. Проверка соответствия требованиям контракта категорий качества ЭРИ отечественного и иностранного производства, закупленных для применения в оборудовании КА	Сопроводительная документация на ЭРИ
2. Проверка фактического объема и результатов испытаний комплектующих ЭРИ отечественного производства и их соответствие требованиям согласованной «Программы дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ для обеспечения комплектации бортовой аппаратуры КА с 15-летним сроком эксплуатации на ГСО»	Карты регистрации результатов испытаний. Протоколы РФА.
3. Проверка соответствия требованиям контракта документов, оформленных ИТЦ (ИЛ) по результатам проведенных испытаний ЭРИ отечественного производства и направляемых потребителям ЭРИ	Заключения ИТЦ (ИЛ) по результатам дополнительных испытаний ЭРИ. Итоговый отчет генподрядчика о результатах проведенных дополнительных испытаниях ЭРИ
4. Анализ данных о забракованных ЭРИ при испытаниях в ИТЦ (по объему и причинам забракования) и проверка выполнения требований по критериям оценки пригодности партий ЭРИ для применения в аппаратуре КА	Журнал учета рекламационной работы. Рекламационные акты. Акты исследования
5. Анализ результатов рекламирования ЭРИ предприятиям-изготовителям, забракованных в ИТЦ по результатам испытаний в объеме требований ТУ	Журнал учета рекламационной работы. Рекламационные акты. Акты исследования
6. Анализ результатов сертификации (в системе ФСС КТ) комплектующих ЭРИ иностранного производства (ЭРИ ИП), предназначенных для применения в оборудовании, изготавливаемом предприятиями РФ	Модель эксплуатации комплектующих ЭРИ ИП. Программы сертификационных испытаний ЭРИ ИП. Протоколы сертификационных испытаний ЭРИ ИП. Сертификаты ФСС КТ

Приложение Л
ТИПОВАЯ ПРОГРАММА КРИТИЧЕСКОГО РАССМОТРЕНИЯ ПРОЕКТА (CDR)

Цель рассмотрения: проверка соответствия результатов проектирования и квалификации оборудования, подсистем и КА в целом (далее – изделие, если не указано особо) требованиям контракта. Проверка полноты и качества разработанного комплекта конструкторской документации (КД).

Таблица Л.1

Содержание работы	Анализируемая документация
<p>1. Анализ состояния с разработкой и выпуском рабочей КД (включая программно-методическую и эксплуатационную документацию) в части ее соответствия схеме деления и утвержденному «Перечню разрабатываемой документации...»</p>	<p>Схема деления изделия. Утвержденный «Перечень разрабатываемой документации...». Основные комплекты КД на изделие и его составные части. Программы и методики испытаний. ТЗ, спецификации. Технические условия. Формуляр, паспорт. Руководство по эксплуатации. Акт о присвоении КД лигеры</p>
<p>2. Анализ соответствия изделию требованиям ТЗ (спецификаций) – матрица соответствия по результатам испытаний и анализов, включая анализы надежности, радиационной стойкости, нештатных ситуаций и др.</p>	<p>Таблица соответствия изделию требованиям ТЗ (спецификации) по результатам испытаний, расчетов и анализов, включая:</p> <ul style="list-style-type: none"> – анализ надежности (безотказности, сохраняемости и ресурса); – функциональный анализ; – АВПКО; – анализ худшего случая; – анализ нештатных ситуаций; – расчет радиационной стойкости по дозовым эффектам и эффектам одиночных событий; – тепловой расчет; – механический анализ; – анализ ЭМС
<p>3. Анализ соответствия НЭО по составу испытаний и уровням воздействующих факторов контрактным требованиям по квалификации и приемке</p>	<p>Программы обеспечения надежности (ПОН) и безопасности (ПОБ). КПЭО. Программы и методики квалификационных испытаний. Отчет по наземной экспериментальной отработке. Протоколы испытаний</p>

Содержание работы	Анализируемая документация
4. Анализ выявленных в процессе квалификации изделия несоответствий, причин несоответствий, достаточности принятых мер по их устранению и предупреждению повторяемости	Стандарт предприятия по работе с несоответствующей продукцией. Несоответствия, зарегистрированные в процессе квалификации изделия. Документация по исследованию причин несоответствий, корректирующим и предупреждающим действиям. Документация по квалификации выполненных корректирующих и предупреждающих действий
5. Анализ соответствия перечня критичных элементов результатам АВПКО. Анализ полноты и достаточности мероприятий по контролю критичных элементов на этапах проектирования, изготовления и испытаний изделий	АВПКО. Перечень и программа контроля критичных элементов
6. Контроль учета особо ответственных (критичных) технологических операций (процессов) изготовления	Перечень особо ответственных (критичных) технологических операций (процессов) изготовления изделия. Комплекты ТД на изготовление изделия
7. Анализ программ дополнительных испытаний ЭРИ ОП в ИГЦ и на предприятиях-изготовителях ЭРИ на соответствие требованиям программы испытаний ЭРИ, предназначенных для применения в аппаратуре КА, согласованной с заказчиком	Программы дополнительных испытаний комплектующих ЭРИ в испытательных технических центрах (ИТЦ). Программы дополнительных испытаний ЭРИ на предприятиях-изготовителях, поставляемых по решениям о спецартиях. Договора на поставку ЭРИ по решениям о спецартиях
8. Анализ соответствия требований, предъявляемых к ЭРИ собственного изготовления по надежности и стойкости к воздействию ИИ, требованиям модели эксплуатации КА. Анализ соответствия состава испытаний и уровней воздействующих факторов требованиям ТУ, программам и методикам испытаний. Анализ соответствия показателей надежности и радиационной стойкости требованиям ТУ	Технические условия на ЭРИ собственного изготовления. Программы и методики испытаний ЭРИ собственного изготовления. Протоколы ПРИ, ПСИ, ПИ и типовых испытаний ЭРИ собственного изготовления
9. Анализ полноты состава сертификационных испытаний ЭРИ ИП на соответствие модели эксплуатации в составе аппаратуры КА	Программы сертификации и сертификационных испытаний ЭРИ ИП. Протоколы и заключения с результатами сертификационных испытаний
10. Анализ соответствия комплекта ТД требованиям КД и НД, устанавливающим требованиям к типовым технологическим процессам и операциям	Комплекты технологической документации. Акты об отработке и внедрении технологических процессов. Акт о присвоении литеры «О»
11. Анализ соответствия ведомостей примененных ЭРИ и материалов перечню ЭРИ и перечню материалов, разрешенных для применения в КА. Определение необходимости проведения работ по подтверждению квалификации ЭРИ, не имеющих летного опыта эксплуатации	Перечни применяемых материалов и комплектующих ЭРИ. Данные о наличии летного опыта эксплуатации комплектующих ЭРИ

Содержание работы	Анализируемая документация
12. Анализ соответствия условий и термозлектрических режимов работы ЭРИ в аппаратуре требованиям по квалификации и требованиям перечня ЭРИ, разрешенных для применения в аппаратуре КА (с учетом установленных ограничений на коэффициенты нагрузки)	<p>Карты рабочих режимов.</p> <p>Протоколы расчета и измерения термозлектрических режимов работы ЭРИ в аппаратуре.</p> <p>Анализы нагрузок.</p> <p>Протоколы разрешения применения (ПРП) ЭРИ.</p> <p>Тепловой анализ.</p> <p>Анализ механических нагрузок</p>
13. Анализ соответствия электрофизических, программно-логических, тепловых и механических внутренних и внешних интерфейсов изделия (систем) требованиям к интерфейсам, эскизному проекту и ДКИ	<p>Требования к электрофизическим, программно-логическим, тепловым и механическим внутренним и внешним интерфейсам изделия (систем).</p> <p>Документы контроля интерфейсов.</p> <p>Эскизный проект в части обоснования состава и объема квалификации интерфейсов бортовых систем.</p> <p>Анализы, расчеты и протоколы испытаний, подтверждающие квалификацию интерфейсов бортовых систем</p>
14. Анализ соответствия алгоритмов ПО логике функционирования оборудования, систем и КА	<p>Архитектурные и детальные проекты ПО.</p> <p>Отчеты по автономной отладке ПО оборудования; автономной отладке ПО бортовых систем; комплексной отладке ПО бортовых систем; комплексной отладке бортового ПО</p>
15. Анализ соответствия состава приемочных испытаний КА, их последовательности и уровней воздействующих факторов требованиям контракта	<p>Программы и методики приемочных испытаний КА</p>
16. Анализ соответствия ЛИ КК требованиям программно-методической документации по ЛИ КК и контракта	<p>Программно-методическая документация по ЛИ КК</p>
17. Проверка соответствия контейнера для транспортирования изделия требованиям ТЗ	<p>ТЗ на создание контейнера.</p> <p>Отчет по результатам испытаний контейнера.</p> <p>Руководство по эксплуатации контейнера</p>
18. Анализ соответствия регламента передачи управления КА и регламента поддержки управления КА со стороны генерального подрядчика и подрядчиков при штатной эксплуатации КА	<p>Регламент передачи управления КА и регламент поддержки управления КА со стороны генерального подрядчика и подрядчиков при штатной эксплуатации КА</p>
19. Анализ выполнения поручений предыдущих рассмотрений, полноты и достаточности материалов, подтверждающих выполнение поручений	<p>Документация приемки эскизного проекта.</p> <p>Протокол рассмотрения квалификации изделия.</p> <p>Доказательная документация, подтверждающая выполнение поручений</p>

ПРОГРАММА ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРИ

Таблица М.1

Наименование работы	Содержание работы	Проверяемая (используемая) документация
1. Проверка номенклатуры комплектующих ЭРИ	<p>Проверка соответствия номенклатуры комплектующих ЭРИ, примененных в аппаратуре, действующему ограничительному перечню.</p> <p>Оценка соответствия протоколов разрешения применения на ЭРИ в аппаратуре контрактным требованиям и ГОСТ 2.124. Выявление комплектующих ЭРИ, разрешения на применение которых в аппаратуре обусловлены ограничениями, установленными в ТУ и/или ПрП</p>	<p>Перечень примененных ЭРИ.</p> <p>Протоколы разрешения применения (ПрП) ЭРИ.</p> <p>Перечень ЭРИ, разрешенных для применения в аппаратуре КА</p>
2. Проверка термозлектрических режимов работы ЭРИ	<p>Проверка наличия, полноты и правильности заполнения КРР ЭРИ.</p> <p>Проверка соответствия термозлектрических режимов работы ЭРИ требованиям ТУ, протоколов разрешения применения и ограничениям, содержащимся в «Требованиях к ЭРИ платформы Экспресс-1000Н» (с учетом переходных режимов работы аппаратуры и реальных нагрузок сопрягаемых устройств).</p> <p>Анализ использованных разработчиками методов оценки фактических электрических и тепловых режимов работы ЭРИ в аппаратуре</p>	<p>Комплект электрических схем.</p> <p>Комплект карт рабочих режимов (КРР) ЭРИ.</p> <p>Отчеты по результатам расчетного или экспериментального определения фактических электрических и тепловых нагрузок ЭРИ в аппаратуре</p>
3. Анализ качества примененных ЭРИ	<p>Рассмотрение заключений ИТЦ по результатам испытаний ЭРИ.</p> <p>Анализ данных о количестве и характере дефектов, выявленных при испытаниях ЭРИ в ИТЦ</p>	<p>Заключения ИТЦ о результатах испытаний ЭРИ.</p> <p>(Программа дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ)</p>
4. Анализ правильности применения изделий собственного изготовления (трансформаторы, дроссели и др.)	<p>Анализ соответствия требований ТУ на изделия собственного изготовления (трансформаторы, дроссели и др.) модели их эксплуатации в аппаратуре.</p> <p>Проверка полноты отработочных испытаний и анализ результатов приемосдаточных испытаний изделий собственного изготовления.</p>	<p>ТЗ на разработку изделий собственного изготовления.</p> <p>ТУ на изделия собственного изготовления.</p> <p>КРР на изделия собственного изготовления.</p>

Наименование работы	Содержание работы	Проверяемая (используемая) документация
	Проверка наличия, полноты и правильности заполнения КРР изделий собственного изготовления	Отчеты о результатах отработочных и приемосдаточных испытаний изделий собственного изготовления
5. Проверка условий монтажа ЭРИ в аппаратуру	<p>Проверка соответствия техпроцесса изготовления аппаратуры требованиям НД на ЭРИ (в части допустимых уровней технологических воздействий на ЭРИ).</p> <p>Анализ технологической документации в части выполнения операций формовки, обрезки, лужения и пайки выводов ЭРИ (производства предприятий РФ и иностранного производства), установки ЭРИ на платы, очистки плат и ЭРИ от остатков флюса, влагозащиты и дополнительного крепления ЭРИ лаками и компаундами.</p> <p>Оценка состояния технологического и испытательного оборудования, квалификации персонала.</p> <p>Проверка соблюдения требований технологической документации на рабочих местах при изготовлении составных частей аппаратуры (плат, модулей), при их сборке и испытаниях, включая соблюдение требований по хранению, учету и обеспечению прослеживаемости ЭРИ.</p> <p>Анализ порядка и результатов контроля технологической дисциплины, выполняемого ОТК</p>	<p>Типовой технологический процесс.</p> <p>Маршрутные и операционные карты.</p> <p>Технологические паспорта.</p> <p>Протоколы аттестации оборудования и персонала.</p> <p>Журналы контроля условий производства.</p> <p>Журналы контроля технологической дисциплины.</p> <p>Стандарт (инструкция и/или т.п.), регламентирующий обеспечение прослеживаемости ЭРИ</p>

Приложение Н

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ ПРАВИЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРИ

Таблица Н.1

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
1. Номенклатура при- менных ЭРИ	<p>Первым обязательным этапом проверки должно быть получение заверенных подписями должностных лиц (главного конструктора аппаратуры или начальника соответствующего отдела):</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечня сборочных единиц аппаратуры; – ведомости примененных комплектующих ЭРИ. <p>Каждый тип ЭРИ из ведомости должен быть проверен на соответствие согласованному с ОАО «ГКС» перечню ЭРИ, разрешенных для применения в аппаратуре рассматриваемого КА. Соответствие проверяется по обозначению ЭРИ, номеру ТУ и категории качества («ОС» или «ВП»)</p>
2. Протоколы разре- шения применения (ПрП) ЭРИ	<p>Если основанием для включения ЭРИ в перечень разрешенных является протокол разрешения применения (ПрП) ЭРИ, то необходимо рассмотреть данное ПрП на предмет соответствия требованиям ГОСТ 2.124. Основное внима- ние должно быть уделено проверке:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличия указания о том, что ПрП выдан на ЭРИ для применения в рассматриваемой аппаратуре для рассматривае- мого КА; – наличия подписей предприятия-поставщика данного ЭРИ на предприятии; – наличия утверждающей подписи головной организации по применению ЭРИ данного класса (для микросхем и полупроводниковых приборов – ОАО «ЦКБ «Дейтон»; для резисторов, соединителей, резонаторов, генераторов, радиодеталей, вставок плавких, моточных изделий – ОАО «Циклон-Тест»; для электромагнитных реле – ОАО «Се- верная заря»); – причины выдачи ПрП (в чем состоит отступление от ТУ на ЭРИ) и условий (ограничений на применение), при которых действует данное разрешение; <p>Копии ПрП на ЭРИ, примененные в проверяемой аппаратуре, необходимо включить в протокол проверки в качестве приложений</p>
3. ЭРИ собственного изготовления	<p>Необходимо убедиться в том, что в составе представленных для проверки ведомостей примененных ЭРИ содержатся и ЭРИ «собственного изготовления» (ЭРИ, которые изготавливаются аппаратостроительным предприятием для при- менения в разработанной им аппаратуре, которая подвергается проверке). На ЭРИ «собственного изготовления» должны быть выпущены ТУ, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ РВ 20.39.415 и содержать требова- ния по стойкости к воздействию внешних факторов (включая факторы космического пространства) и надежности, соответствующие модели эксплуатации ЭРИ в аппаратуре рассматриваемого КА. ТУ на ЭРИ «собственного изготов- ления» должно также содержать систему подтверждения их соответствия заданным требованиям. Проверяющий</p>

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
	<p>должен получить и рассмотреть результаты функционирования указанной системы для ЭРИ, примененных в проверяемой аппаратуре.</p> <p>Каждое выявленное несоответствие необходимо зафиксировать в протоколе и сформулировать поручение по его устранению</p>
<p>4. Электрические схемы аппаратуры</p>	<p>При проведении контроля электрических режимов работы ЭРИ необходимо установить:</p> <ul style="list-style-type: none"> – соответствие электрических режимов ЭРИ требованиям НД (ОТУ, ТУ или руководств по применению ЭРИ) на них; – правильность применения ЭРИ по функциональному назначению в соответствии с НД на них; – выполнение указаний по выбору электрического режима или по применению ЭРИ, приведенных в НД на них (применение ограничивающих резисторов, соблюдение порядка подачи напряжений на электроды и т.п.); – наличие разрешений на применение ЭРИ с отступлением от требований НД на них при применении не по прямому функциональному назначению или в режиме, не оговоренном в НД. <p>Фактические значения электрических режимов ЭРИ в схемах аппаратуры должны быть определены путем инструментальных измерений или путем их расчета, если измерения невозможны или не позволяют определить наиболее «тяжелый» режим ЭРИ.</p> <p>При этом оцениваемые значения электрических параметров режима ЭРИ в схемах аппаратуры должны соответствовать наиболее «тяжелым» режимам работы ЭРИ, определяемым с учетом наиболее неблагоприятных изменений условий эксплуатации аппаратуры (температуры и давления окружающей среды), напряжений источников питания, разбросов и сочетаний параметров ЭРИ и источников сигналов, положений органов регулировки, а также с учетом переходных процессов при включении и выключении источников питания, возможности возникновения электрических разрядов в схемах с энергоёмкими элементами и др.</p> <p>При выполнении оценки необходимо считать, что ЭРИ применено в режиме, не оговоренном в НД, если работоспособность схемы аппаратуры, в которой применено ЭРИ, определяется параметром или свойством ЭРИ, не контролируемым или не гарантируемым НД на ЭРИ.</p> <p>ЭРИ является примененным не по прямому функциональному назначению, если назначение оговорено в НД на ЭРИ, но не соответствует назначению ЭРИ в аппаратуре</p>
<p>5. Карты рабочих режимов ЭРИ, примененных в аппаратуре</p>	<p>Электрические режимы всех ЭРИ, примененных в аппаратуре, должны быть отражены в КРР.</p> <p>При проверке правильности составления КРР ЭРИ необходимо проверить:</p> <ul style="list-style-type: none"> – соответствие формы и порядка заполнения КРР ЭРИ требованиям Руководства РДВ 319.01.09–94; – наличие КРР на все ЭРИ, применяемые в аппаратуре (в том числе и на ЭРИ собственной разработки); – полноту и правильность заполнения КРР (с учетом того, что в КРР заносятся наиболее тяжелые режимы работы ЭРИ); – правильность определения и указания предельно допустимых электрических режимов ЭРИ в соответствии с требованиями НД с учетом их зависимости от температуры, давления окружающей среды, частоты питающего напряжения и других параметров; – наличие согласования КРР с контролирующими службами на предприятии

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
6. Результаты проверки по режимам применения ЭРИ	<p>К нарушениям правильности применения ЭРИ по режимам работы ЭРИ относятся:</p> <ul style="list-style-type: none"> – превышение предельно допустимых электрических режимов, приведенных в НД на ЭРИ (при отсутствии разрешения головных предприятий по применению ЭРИ и поставщиков ЭРИ в виде ПРП); – применение ЭРИ не по прямому функциональному назначению или в режимах, не оговоренных в НД (при отсутствии разрешения головных предприятий по применению ЭРИ и поставщиков ЭРИ в виде ПРП); – невыполнение требований НД на ЭРИ по особенностям их применения в схемах аппаратуры. <p>Оценка электрических режимов ЭРИ должна завершаться отработкой предложенный по устранению выявленных недостатков и нарушений и составлением соответствующего протокола</p>
7. Технология монтажа ЭРИ в аппаратуру	<p>Оценку условий монтажа ЭРИ в аппаратуре проводят с целью определения полноты учета и ограждения в технологической и конструкторской документации на аппаратуру указаний и рекомендаций, содержащихся в НД на ЭРИ.</p> <p>При анализе технологической и конструкторской документации на аппаратуру необходимо проверить выполнение требований НД на ЭРИ в части:</p> <ul style="list-style-type: none"> – способа установки ЭРИ; – условий формовки выводов ЭРИ; – использования незадействованных выводов ЭРИ; – условий и режимов лужения, пайки (сварки), повторной пайки (сварки) выводов ЭРИ; – усилений, прикладываемых к ЭРИ при их установке; – соблюдения расстояний между корпусами ЭРИ, корпусами изделий и платами, на которые они устанавливаются; – режимов очистки изделий от флюса; – способов и условий покрытия ЭРИ полимерными покрытиями; – защиты ЭРИ от разрядов статического электричества. <p>При выявлении отступлений от требований НД на ЭРИ в рассматриваемом документе могут приниматься разрешения головных предприятий и предприятий-поставщиков ЭРИ на допущенные отступления от требований НД по условиям монтажа ЭРИ в аппаратуру, оформленные в виде ПРП.</p> <p>Одним из наиболее важных вопросов, рассматриваемых при проверке правильности применения ЭРИ на этапе изготовления аппаратуры, является оценка состояния технологического оборудования, оснастки и средств измерения с точки зрения исключения возможности повреждения ими ЭРИ.</p> <p>Основные рекомендации по рассмотрению данного вопроса состоят в следующем:</p> <ul style="list-style-type: none"> – оборудование, оснастка и средства измерения, применяемые при выполнении и контроле операций изготовления аппаратуры, должны быть аттестованы; – периодичность аттестации должна быть указана в паспортах и типовых технологических процессах; – оборудование, оснастка и средства измерения должны быть заземлены; – оборудование и оснастка для формовки и обрезки выводов ЭРИ должны обеспечивать: <ul style="list-style-type: none"> • фиксацию и крепление выводов ЭРИ вне зоны, не пригодной для монтажа;

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
	<ul style="list-style-type: none"> ● значения растягивающей и изгибающей сил; ● значение динамического растягивающего усилия в выводах ИС в корпусах 401.14 в момент формовки – по ОСТ 11.073.063; <p>– оборудование, применяемое для лужения и пайки выводов ЭРИ, должно обеспечивать:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● контроль и автоматическое поддержание температуры расплавленного припоя и жала паяющего стержня с погрешностью $\pm 10^{\circ}\text{C}$; ● контроль времени лужения и пайки; ● заданное расстояние от корпуса ЭРИ до зеркала припоя; ● переходное сопротивление от рабочей части жала паяющего стержня к заземляющему контакту вилки – не более 0,5 Ом; <p>– оборудование, применяемое для механизированных способов очистки печатных плат, должно обеспечивать автоматическое поддержание и контроль параметров режима очистки.</p> <p>Проверка условий монтажа ЭРИ в аппаратуре должна заканчиваться отработкой предложений по устранению выявленных недостатков и нарушений и составлением соответствующего раздела протокола</p>

Приложение О
**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ РАСЧЕТОВ И АНАЛИЗОВ
 НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Таблица О.1

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
<p>Требования к надежности. Критерии отказа и предельного состояния</p>	<p>Набор показателей и количественные значения оцениваемых расчетом требований к надежности должны соответствовать ТЗ (спецификации) на оборудование. Критерии отказа (используются при задании требований и расчете безотказности, сохраняемости и ремонтпригодности) и критерии предельного состояния (используются при задании требований и расчете показателей долговечности) должны соответствовать ТЗ (спецификации) на оборудование</p>
<p>Исходные данные по надежности элементов оборудования</p>	<p>Исходные данные для расчета надежности оборудования должны выбираться из официальных источников. Официальными источниками исходных данных по интенсивности отказов для комплектов ЭРИ отечественного производства служит справочник «Надежность электрорадиоизделий» (МО РФ, 2006), для ЭРИ иностранного производства – военный справочник США MIL-HDBK-217F «Прогноз надежности характеристик электронного оборудования». Целесообразно проверить (можно выборочно) достоверность используемых при расчетах показателей безотказности прибора исходных данных по интенсивности отказов: – ЭРИ собственного изготовления; – основных видов соединений ЭРИ на печатных платах. По первому пункту от предприятия необходимо потребовать соответствующие статистические данные. Допускается уточнение данных указанных выше источников на основе технических решений, согласованных заказчиком оборудования</p>
<p>Методика расчета</p>	<p>Методика расчета надежности должна быть согласована с заказчиком оборудования. Расчет надежности резервированных модулей, как правило, выполняется с помощью структурного метода расчета показателей надежности (ПН), который основан на представлении модуля в виде структурной схемы надежности (ССН) с последующим описанием ССН адекватной математической моделью и вычислением ПН модуля по известным характеристикам надежности его элементов. Критерием отказа резервированного модуля является отказ одного любого элемента, входящего в ССН. В ССН включаются все ЭРИ, отказ которых приводит к нарушению работоспособности модуля, в ССН не включаются ЭРИ, которые не используются при штатной эксплуатации модуля. ССН прибора должна соответствовать его функциональной и принципиальной схемам, отчету по АВПКО и критерию отказа. В соответствии с этим ССН прибора должна отражать вид, кратность и способ резервирования элементов оборудования. В ССН приборов и аппаратуры должны быть включены возможные отказы всех компонент надежности оборудования, включая отказы переключате-</p>

Объекты контроля	Рекомендации по проверке
<p>Результаты расчета</p>	<p>лей, осуществляющих отключение отказавших и подключение резервных элементов, отказы паяных соединений и т.п.</p> <p>Целесообразно провести анализ обоснованности допущений, принятых при расчете надежности (например, допущение об идеальной надежности переключателей резервированных элементов, допущение о преобладающих видах отказов элементов и т.п.).</p> <p>Методика расчета показателей безотказности должна базироваться на ССН.</p> <p>Методика расчета показателей безотказности, как правило, реализует принцип «слабого звена», т.е. показатель долговечности самого недолговечного элемента определяет показатель долговечности всего прибора в целом. Аналогично может решаться задача расчета сохраняемости приборов</p> <p>В разделе «Выводы» должно быть проведено сопоставление требуемых по ТЗ значений показателей надежности и полученных в результате расчета.</p> <p>Если расчетные значения ниже требуемых, то должны быть предложены мероприятия, позволяющие повысить надежность прибора до заданного уровня.</p> <p>Целесообразно по результатам расчета получить также ответ на вопрос о том, какие элементы в наибольшей степени влияют на уровни безотказности и долговечности прибора. Применительно к этим элементам целесообразно провести анализ возможности их замены на более надежные или принятия дополнительных мер по снижению термозлектрических и механических нагрузок</p>

Приложение П
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ АНАЛИЗА СТОЙКОСТИ
ОБОРУДОВАНИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО
ПРОСТРАНСТВА ПО ДОЗОВЫМ ЭФФЕКТАМ

Т а б л и ц а П.1

Объект контроля	Рекомендации по проверке
Требования стойкости к воздействию ИИ КП по дозовым эффектам	Срок эксплуатации на орбите, состав и уровни ИИ КП по полной ионизационной поглощенной дозе и дозе (потоку протонов) по эффектам структурных повреждений по всему пространству в угле 4π за различной толщиной защиты должны соответствовать ТЗ (спецификации) на оборудование (аппаратуру)
Допустимый коэффициент запаса по дозе $K_{\text{зап,доп}}$	Коэффициент запаса по дозе $K_{\text{зап,доп}}$ (критерий, определяющий необходимость проведения испытаний отдельных блоков (ЭРИ) оборудования (аппаратуры) на стойкость к воздействию ИИ КП) должен соответствовать ТЗ (спецификации) на оборудование. Значение коэффициента запаса для вновь разрабатываемой аппаратуры должно быть не менее трех в соответствии с ОСТ 134-1034
Исходные данные по защищенности элементов оборудования (блоков, модулей, ЭРИ) в составе КА	В отчете должны быть представлены данные о защищенности (толщине защиты) элементов оборудования (блоков, модулей, функциональных узлов, ЭРИ) от воздействия ИИ КП в составе КА. Исходные данные по защищенности элементов оборудования в составе КА формируются на основе 3D-проектирования, например в среде SolidWorks. Для каждого отдельного ЭРИ данные представляют собой матрицу значений эквивалентной толщины защиты в малых телесных углах (в пределах которых толщину защиты можно считать постоянной), равномерно распределенных по различным направлениям полного пространства в угле 4π. На практике матрица содержит обычно от 800 до 20 000 телесных углов. Поскольку, как правило, в любом направлении защита является разнородной, состоящей из различных материалов, ее приводят к плотности алюминия и суммарную толщину защиты выдают в единицах г·см ⁻² . Совокупность таких матриц для всех Ки оборудования (обычно ограничиваются изделями, имеющими малый коэффициент запаса по дозе) совместно с зависимостью дозы от толщины защиты, установленной в ТЗ (спецификации), представляет собой геометрическую радиационную модель оборудования по дозовым эффектам в составе КА. Радиационная модель в части исходных данных по защищенности ЭРИ оборудования изменяется с изменением компоновки КА

Объект контроля	Рекомендации по проверке
<p>Исходные данные о стойкости всех ЭРИ в составе оборудования к воздействию ИИ. Методика испытаний ЭРИ на стойкость к воздействию ИИ КП</p>	<p>В отчете должны быть представлены данные о стойкости ЭРИ к воздействию ИИ КП, выраженные в единицах поглощенной дозы. Указанные данные приводят в соответствии с ТУ (для ЭРИ отечественного производства) и сертификатами (для ЭРИ иностранного производства) на ЭРИ или по результатам радиационных испытаний ЭРИ. Должно быть проверено, что исходные данные о стойкости ЭРИ получены путем испытаний именно тех изделий, которые входят в состав партий, использованных для комплектации аппаратуры. При этом методика и периодичность испытаний ЭРИ должны соответствовать требованиям ОСТ 134-1034</p>
<p>Методика оценки стойкости оборудования. Критерии оценки соответствия оборудования требованиям стойкости. Результаты оценки стойкости</p>	<p>Оценка стойкости оборудования, как правило, осуществляется поэлементным методом. В соответствии с данным методом уровень стойкости оборудования ограничивается стойкостью ЭРИ, имеющего наименьший коэффициент запаса по дозе. Используя радиационную модель оборудования в составе КА, рассчитывают значения коэффициентов запаса по дозе для ЭРИ в составе оборудования по формуле $K_{\text{зап}} = \frac{D_{\text{эри}}}{D_{\text{доп}}}$. Здесь $D_{\text{эри}}$ – уровень стойкости ЭРИ, $D_{\text{доп}}$ – локальный радиационный уровень дозы в месте расположения ЭРИ</p> <p>Необходимо убедиться, что для всех ЭРИ выполняется критерий $K_{\text{зап}} \geq K_{\text{зап,доп}}$. Если данное условие выполняется, то оборудование считается соответствующим требованиям стойкости воздействию ИИ КП по дозовым эффектам. Если выполняется условие $1 \leq K_{\text{зап}} < K_{\text{зап,доп}}$, то оборудование считается стойким к воздействию ИИ КП, но требуется подтверждение стойкости путем проведения испытаний на установках, моделирующих ИИ КП, либо оборудования целиком, либо наименее стойких модулей, либо наименее стойких ЭРИ</p> <p>Если $K_{\text{зап}} < 1$, то оборудование считается не стойким к воздействию ИИ КП. В этом случае требуется его доработка. Доработка, как правило, предусматривает либо дополнительную локальную защиту отдельных ЭРИ на уровне модулей (плата), либо дополнительную защиту оборудования целиком. В случае когда применение защиты не приводит к желаемому результату, необходима замена ЭРИ более радиационно стойкими изделиями. Но при этом, возможно, потребуется схемотехническая и конструктивная доработка оборудования, так как функциональные аналоги ЭРИ не всегда являются полными аналогами. В наиболее сложных ситуациях могут быть рассмотрены варианты изменения компоновки КА и защиты оборудования на уровне КА в целом. Необходимо проверить наличие в отчете конкретных мероприятий по обеспечению радиационной стойкости оборудования</p> <p>В разделе отчета «Выводы» должен быть сделан вывод о соответствии оборудования требованиям стойкости к воздействию ИИ КП. В случае когда такой вывод в отношении оборудования в целом не может быть сделан, должны быть перечислены блоки, модули и ЭРИ, ограничивающие стойкость оборудования на уровне ниже требований ТЗ, а также указаны конкретные мероприятия по обеспечению стойкости оборудования к воздействию ИИ КП по дозовым эффектам</p>
<p>Выводы отчета</p>	

Приложение Р
**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ АНАЛИЗА СТОЙКОСТИ
 ОБОРУДОВАНИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО
 ПРОСТРАНСТВА ПО ЭФФЕКТАМ ОДИНОЧНЫХ СОБЫТИЙ**

Таблица Р.1

Объект контроля	Рекомендации по проверке
Требования стойкости оборудования (аппаратуры) к воздействию заряженных частиц (ЗЧ) КП по одиночным эффектам	<p>Срок эксплуатации аппаратуры, состав и уровни ЗЧ КП за различной толщиной сферической защиты должны соответствовать ТЗ (спецификации) на аппаратуру.</p> <p>Для вновь разрабатываемой аппаратуры состав требований должен включать в соответствии с ОСТ 134-1044:</p> <ul style="list-style-type: none"> – интегральные энергетические спектры плотности потока протонов ГКЛ; – интегральные спектры линейной передачи энергии (ЛПЭ) плотности потока ТЗЧ ГКЛ; – интегральные энергетические спектры средней плотности потока протонов СКЛ; – интегральные энергетические спектры максимальной плотности потока протонов СКЛ; – интегральные спектры ЛПЭ максимальной плотности потока ТЗЧ СКЛ; – интегральные спектры ЛПЭ средней плотности потока ТЗЧ СКЛ; – интегральные энергетические спектры средней плотности потока протонов ЕРПЗ; – интегральные энергетические спектры максимальной плотности потока протонов ЕРПЗ <p>В качестве показателей стойкости аппаратуры к воздействию ЗЧ КП в соответствии с РД 134-0139 по одиночным сбоям и отказам устанавливаются частоту сбоев $V_{РЭА}$ (число сбоев в единицу времени), а по катастрофическим отказам – вероятность возникновения катастрофических отказов $P_{РЭА}$ (вероятность возникновения хотя бы одного отказа ЭРИ в аппаратуре при заданном потоке ЗЧ).</p> <p><i>Примечание.</i> В ТЗ на аппаратуру не всегда устанавливаются допустимые значения указанных показателей</p>
Показатели стойкости аппаратуры к воздействию ЗЧ КП	
Критерии сбоестойчивости и отказоустойчивости аппаратуры к воздействию ЗЧ КП	<p>В соответствии с РД 134-0139 аппаратура считается сбоестойчивой к воздействию ЗЧ КП, если частота ее сбоев $V_{РЭА}$ при радиационных условиях, соответствующих требованиям ТЗ, в десять раз меньше допустимой: $V_{РЭА} < 10^{-1} \cdot V_{РЭА, доп}$.</p> <p>В соответствии с РД 134-0139 аппаратура считается отказоустойчивой к воздействию ЗЧ КП, если вероятность $P_{РЭА}$ катастрофических отказов аппаратуры при радиационных условиях, в 10 раз превышающих</p>

Объект контроля	Рекомендации по проверке
<p>Критерий соответствия аппаратуры требованиям стойкости к воздействию 3Ч КП</p> <p>Исходные данные по защищенности 3Ч КП ЭРИ в аппаратуре в составе КА</p>	<p>требования ТЗ, меньше допустимой $P_{PЭА, \text{ном}}$</p> <p>Аппаратура, которая одновременно удовлетворяет критериям сбросоустойчивости и отказоустойчивости, считается стойкой к воздействию 3Ч КП по одиночным эффектам</p> <p>В отчете должны быть представлены данные о защищенности (толщине защиты) чувствительных к воздействию одиночных 3Ч КП ЭРИ в аппаратуре в составе КА. Такие исходные данные по защищенности ЭРИ в аппаратуре в составе КА формируются на основе 3D-проектирования, например в среде SolidWorks</p> <p>Для каждого отдельного ЭРИ данные представляют собой матрицу значений эквивалентной толщины защиты в малых телесных углах (в пределах которых толщину можно считать постоянной), равномерно распределенных по различным направлениям полного телесного угла 4π пространства. На практике матрица содержит обычно от 800 до 20 000 малых телесных углов</p> <p>Поскольку, как правило, в любом направлении защита является разнородной, состоящей из различных материалов, ее приводят к плотности алюминия и суммарную толщину защиты выражают в единицах г·см⁻². Совокупность таких матриц для всех комплекствующих ЭРИ аппаратуры (обычно ограничиваются изделиями, чувствительными к воздействию 3Ч КП по одиночным эффектам) совместно с зависимостями энергетических и ЛПЭ спектров плотности потока 3Ч КП от толщины защиты, установленных в ТЗ, представляет собой геометрическую радиационную модель аппаратуры для одиночных эффектов в составе КА.</p> <p>Радиационная модель в части исходных данных по защищенности ЭРИ аппаратуры изменяется с изменением компоновки КА</p>
<p>Исходные данные о параметрах чувствительности ЭРИ в составе аппаратуры к воздействию одиночных 3Ч КП</p>	<p>В отчете должны быть представлены исходные данные о параметрах чувствительности ЭРИ к воздействию одиночных 3Ч КП по следующим наиболее опасным эффектам:</p> <ul style="list-style-type: none"> – одиночные сбои (возникают в цифровых интегральных схемах (ИС), носят неразрушающий характер); – одиночные переходные события (возникают в линейных биполярных ИС, носят неразрушающий, кратковременный характер); – одиночные события защелки (возникают в КМОП ИС, изготовленных на объемном или эпитаксиальном кремнии, приводят к разрушению ИС); – одиночные события выгорания (возникают в мощных МОП-транзисторах с <i>n</i>-каналом и приводят к его разрушению, МОП-транзисторы с <i>p</i>-каналом не подвержены данному эффекту); – одиночные события разрушения затвора (имеют место в мощных МОП-транзисторах с <i>n</i>- и <i>p</i>-каналом и происходят, когда затворный окисел оказывается под обратным напряжением).

Объект контроля	Рекомендации по проверке
	<p>Каждый из перечисленных выше видов одиночных эффектов характеризуется следующими параметрами чувствительности (за исключением одиночных переходных событий):</p> <p>σ – сечение эффекта (отношение общего количества проявлений эффекта в ЭРИ к потоку частиц);</p> <p>$\sigma P(E)$ – зависимость сечения одиночных эффектов от энергии протонов;</p> <p>$\sigma_{TЗЧ}(L)$ – зависимость сечения одиночных эффектов от ЛПЭ ТЗЧ;</p> <p>E_0 – пороговая энергия протонов (минимальная энергия протонов, при которой наблюдается одиночный эффект);</p> <p>L_0 – пороговое значение ЛПЭ ТЗЧ (минимальная величина ЛПЭ, при которой наблюдается одиночный эффект).</p> <p>Одиночные переходные события характеризуются амплитудно-временными параметрами импульсов, возникающих на выходе ИС</p>
<p>Методика испытаний ЭРИ на стойкость к воздействию одиночных ЗЧ КП</p>	<p>Параметры чувствительности для отечественных ЭРИ по различным одиночным эффектам берут из ТУ на изделия или из официальных справочных данных по радиационной стойкости. Для ЭРИ иностранного производства параметры чувствительности берут из сертификатов или отчетов фирм-изготовителей ЭРИ. В случае отсутствия необходимых данных в указанных документах их можно получить экспериментальным и расчетно-экспериментальным путем по методикам, рекомендованным в документах РД в 319.03.24 и РД в 319.03.38, или использовать типовые значения этих характеристик, приведенные в прил. Б документа РД 134-0139</p>
<p>Методика оценки стойкости аппаратуры. Результаты оценки стойкости</p>	<p>Оценку стойкости аппаратуры к одиночным эффектам выполняют расчетно-экспериментальным методом в соответствии с РД 134-0139. Для расчета частоты сбоев и вероятности отказов ЭРИ с учетом влияния примененных методов парирования сбоев и предотвращения отказов ЭРИ используют экспериментальные данные о параметрах чувствительности ЭРИ к одиночным эффектам. При этом для расчета локальных радиационных уровней нагрузки (плотности потока ЗЧ) ЭРИ в местах их расположения используют геометрическую радиационную модель аппаратуры для одиночных эффектов в составе КА.</p> <p>Частота сбоев составных частей аппаратуры определяется отдельно для ЗЧ СКЛ, ГКЛ и ЕРПЗ с учетом толщины защиты. При этом суммарная частота сбоев при воздействии ЗЧ ГКЛ и ЕРПЗ (постоянно присутствующих в космическом пространстве) определяет «обычный режим» работы аппаратуры, а дополнительный вклад в частоту сбоев, обусловленный эпизодическим появлением потоков ЗЧ СКЛ (продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток), характеризует «экстремальный режим» работы аппаратуры.</p>

Объект контроля	Рекомендации по проверке
	<p>При оценке частоты сбоев за счет действия протонов ЕРПЗ и ЗЧ СКЛ используют спектры максимальных плотностей потоков этих ЗЧ.</p> <p>Вероятность возникновения катастрофических отказов в аппаратуре за счет действия ЗЧ КП определяется по формуле</p> $PРЭА = 1 - \exp(-vTPЭА t),$ <p>где $vTPЭА$ – частота возникновения возможных отказов аппаратуры при воздействии ЗЧ КП с учетом принятых мер по предотвращению отказов ЭРИ, чувствительных к одиночным отказам; t – время, в течение которого аппаратура находится в включенном состоянии при установленном сроке эксплуатации КА.</p> <p>Частота возникновения возможных одиночных отказов в аппаратуре вычисляется как сумма частот отказов аппаратуры при воздействии ЗЧ ГКЛ, ЕРПЗ и СКЛ с учетом толщины защиты.</p> <p>При этом в расчете частоты отказов при воздействии протонов ЕРПЗ и ЗЧ СКЛ используют спектры средних плотностей потоков этих частей.</p> <p>Достоверность результатов расчетно-экспериментальной оценки стойкости аппаратуры по одиночным эффектам может быть подтверждена испытаниям наиболее чувствительных узлов аппаратуры на ускорителях протонов с энергией 200 МэВ – 1 ГэВ.</p> <p>Полученные значения частоты сбоев и вероятности катастрофических отказов аппаратуры сравниваются с допустимыми значениями с использованием критериев обособленности и отказоустойчивости аппаратуры. В случае их выполнения делается вывод о соответствии аппаратуры требованиям ТЗ по стойкости к воздействию ЗЧ КП</p>
Выводы отчета	<p>В разделе отчета «Выводы» должен быть сделан вывод о соответствии аппаратуры требованиям ТЗ по стойкости к воздействию ЗЧ КП по одиночным эффектам. В случае когда такой вывод в отношении аппаратуры в целом не может быть сделан, должны быть перечислены блоки, модули и ЭРИ, ограничивающие стойкость аппаратуры на уровне ниже требований ТЗ, а также указаны конкретные мероприятия по обеспечению стойкости аппаратуры к воздействию ЗЧ КП по одиночным эффектам</p>

ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЙ В ТКО (МР)

Цель рассматривания: проверка качества изготовления сборочных единиц штатного оборудования.

Таблица С.1

Содержание работы	Объекты анализа
<p>1. Проверка наличия конструкторской и технологической документации (КД и ТД) на контролируемую материальную часть и ее соответствие установленным требованиям (по полноте, актуализированному состоянию, читаемости и т.п.)</p> <p>2. Проверка условий производства контролируемой материальной части и персонала</p>	<p>КД и ТД на контролируемую материальную часть, включая технологические карты и технологические паспорта. Извещения на корректировку КД и ТД, впервые внедренные на материальной части рассматриваемого проекта (внедренные после проверки квалификации материальной части или после рассмотрения готовности к изготовлению материальной части). Материалы, подтверждающие обоснованность проведенных изменений КД и ТД на рассматриваемую материальную часть</p> <p>Журналы контроля состояния температуры, влажности, запыленности воздушной среды в производственном помещении и на участке, где проводится изготовление контролируемой материальной части. Журналы периодического контроля состояния технологического оборудования и оснастки (стабильность температуры жала паяльника, сопровождение целей антистатических браслетов и т.п.). Протоколы аттестационных комиссий, свидетельства об аттестации исполнителей, выполнявших работы с материальной частью. Удостоверения на выполнение особо ответственных операций</p>
<p>3. Проверка:</p> <ul style="list-style-type: none"> – качества комплектующих ЭРИ и материалов, примененных в контролируемой материальной части; – соответствия примененных комплектующих требованиям по гарантийным срокам эксплуатации в составе материальной части и КА; – выполнения испытаний комплектующих ЭРИ после хранения более 1 года 	<p>ТУ и ПРП на комплектующие. Ведомости покупных комплектующих. Перечни комплектующих ЭРИ и материалов, разрешенных для применения. Заключение о проведенных дополнительных испытаниях комплектующих ЭРИ и о результатах входного контроля ЭРИ, в том числе о дополнительных испытаниях ЭРИ после хранения более 1 года на складе</p>
<p>4. Проверка выполнения требований КД, ТД и НД в части качества изготовления материальной части (монтаж ЭРИ, пайки, сборки, стопорения и др.) с использованием предусмотренных ТД средств контроля (оптических, акустических, рентгенографических и т.п.) и фоторегистрация</p>	<p>Контролируемая материальная часть и соответствующие документы (КД, ТД и НД, регламентирующие требования к комплектующим, технологическим процессам, применяемым приспособлениям, оснастке и т.п.)</p>

Приложение Т
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ КА В ТКО (МР)

Таблица Т.1

Методические рекомендации

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
1. Проверка документации на оборудование и его сборочные единицы	<p>На первом этапе проверки необходимо установить перечень сборочных единиц оборудования и оценить соответствие предъявленных к рассмотрению сборочных единиц перечню ТКО, согласованному с ОАО «ГКС».</p> <p>Рассмотрению подлежат:</p> <ul style="list-style-type: none"> – КД на проверяемые сборочные единицы оборудования; – технологический паспорт изготавливаемых сборочных единиц; – технологический процесс изготавливаемых сборочных единиц; – сопроводительная документация на сборочные единицы, проверяемые в ТКО; – сопроводительная документация на ЭРИ, примененные в сборочных единицах, включая заключения и свидетельства (карты регистрации результатов испытаний) о прохождении изделиями дополнительных испытаний в ИТЦ, протоколы входного контроля; – документация на рабоче места (паспорт рабочего места, журналы контроля окружающей среды, аттестаты персонала и др.); – оформленные карточки разрешений (КР) на отступления от КД; – нормативная документация, внедренная на предприятии. <p>Конструкторская, технологическая и сопроводительная документация проверяется на:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличие, физическое состояние, читаемость копий КД, ТД; – наличие отметок о выполнении предыдущих операций (до операции ТКО), наличие и качество оформления сопроводительных документов; – наличие в технологическом паспорте отметки ОПК о приемке проверяемой сборочной единицы; – наличие регистрации проведенных измерений параметров, размеров; – наличие заключений о приемке входящих частей; – своевременность внедрения в КД и ТД изменений об изменениях <p>Проверка проводится на участках хранения комплектующих и в производственных помещениях, где ведутся изготовление и испытания оборудования.</p> <p>Проверке подлежат:</p>
2. Соблюдение требований технологического процесса и ТД	

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<ul style="list-style-type: none"> – документы (журналы), отражающие соответствие условий в производственных помещениях установленным требованиям; – инструмент, приспособления, оснастка, в том числе тара для внутрицеховой и межцеховой транспортировки оборудования и его составных частей на соответствие требованиям по аттестации; – документы, подтверждающие выполнение требований к заземлению, по защите от статического электричества согласно ОСТ 92-1615; – исполнители работ в части наличия свидетельств (удостоверений) о прохождении аттестации и допуске исполнителей к данному виду работ
<p>3. Проверка качества купленных комплектующих, ЭРИ и материалов</p>	<p>Купленные комплектующие, ЭРИ и материалы должны быть проверены в части:</p> <ul style="list-style-type: none"> – наличия их в перечнях ЭРИ и материалов, разрешенных для применения в аппаратуре данного КА; – качества комплектующих и материалов по результатам входного контроля на предприятии-изготовителе аппаратуры; – качества ЭРИ по результатам дополнительных испытаний в ИТЦ; – достаточности гарантийного срока комплектующих, ЭРИ и материалов. <p>Необходимо убедиться в наличии маркировочных символов (отметок) ИТЦ на корпусе каждого установленного на плату комплектующего ЭРИ. При отсутствии на отдельных ЭРИ маркировки ИТЦ необходимо потребовать от технологических служб и ОТК объяснений и зафиксировать каждый факт в протоколе ТКО. Могут быть приняты объяснения о нестойкости маркировки ИТЦ к технологической жидкости, применяемой при отмывке печатных плат от остатков флюса. При этом необходимо убедиться в полном соответствии установленных на плату ЭРИ (согласно комплектационной ведомости) сопроводительной документации, поступившей от ИТЦ, о проведенных проверках и дополнительных испытаниях (по номеру партии и дате выпуска ЭРИ)</p>
<p>4. Проверка качества печатных плат, монтажа и пайки ЭРИ на печатные платы</p>	<p>Осмотр проверяемой сборочной единицы необходимо начинать с проверки соответствия маркировки, индекса, номера, указанных в сопроводительной документации и представленных на сборочной единице. Учитывая этап изготовления оборудования, на котором проводятся ТКО (печатные платы с установленными на них ЭРИ до покрытия лаком), непосредственная проверка качества изготовления в основном состоит в рассмотрении качества применяемой печатной платы, качества монтажа и пайки ЭРИ.</p> <p>Применяемые печатные платы должны соответствовать ГОСТ 23752–79 (ОТУ на печатные платы). Данным документом следует пользоваться для оценки допустимости выявляемых недостатков внешнего вида печатных плат (одиночные царапины, нарушения сплошности покрытия и др.). Особое внимание необходимо обращать на качество выполненного ремонта печатных плат. Согласно ГОСТ 27200–87 и РД 50-708–91 допускается: – отремонтированных мест печатных плат не более 3 на 1 дм², но не более 10 на всей поверхности платы;</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<p>– отремонтрованных контактных площадок должно быть не более 2% от общего числа контактных площадок, но их не должно быть более 10;</p> <p>– отремонтрованных печатных проводников не более 1%, но не более 10;</p> <p>– отремонтрованных металлизированных отверстий не более 1% от общего числа металлизированных отверстий, но не более 15.</p> <p>Количество навесных перемычек в печатных узлах устанавливается в размере 5% от числа точек подсоединения выводов элементов к печатной плате. Однако по решению Главного конструктора в обоснованных технических случаях их число может быть увеличено.</p> <p>При проверке качества пайки необходимо убедиться в выполнении требований ОСТ 92.1042–98:</p> <p>– лужение выводов ЭРИ должно проводиться не ближе чем 1 мм от корпуса ЭРИ;</p> <p>– поверхность припоя в паяном соединении должна быть блестящей, без темных пятен, трещин, раковин, загрязнений, острых выпуклостей и посторонних включений.</p> <p>Необходимо убедиться в полном выполнении требований ОСТ 11 073.063 по обращению с микросхемами в корпусах типа 1, 2, 3, 5 и 43. В соответствии с этими требованиями данные микросхемы при их применении необходимо брать за корпус пинцетом (захватом). Микросхемы в корпусах типа 4 следует брать пинцетом за торцы корпуса, не имеющие выводов, либо магнитным или вакуумным пинцетом за крышку корпуса.</p> <p>Необходимо проверять допустимость выполненной при установке ЭРИ обрезки незадействованных выводов. При отсутствии в ТУ на ЭРИ (чаще всего ИС) указаний о допустимости обрезки незадействованных выводов она может проводиться лишь при наличии разрешения головного предприятия по применению ЭРИ (в части микросхем – ОАО «ЦКБ «Дейтон»).</p> <p>Критериями качественного выполнения операций формовки и обрезки выводов ЭРИ являются соответствие их геометрических размеров требованиям ТУ, КД и ТД, отсутствие нарушений покрытий выводов, сохранение целостности корпуса, отсутствие повреждений компаунда, стекла и керамики в местах спая с выводами.</p> <p>Ориентация ЭРИ при установке не должна препятствовать просмотру маркировки.</p> <p>Критерием качества установки ЭРИ является соответствие требованиям ТУ на них и КД на аппаратуру, а также отсутствие деформации корпусов и выводов ЭРИ.</p> <p>Критерием качественного выполнения операции лужения является ровная гладкая поверхность облуженного вывода, отсутствие на этой поверхности пор, трещин, раковин.</p> <p>Основным методом контроля качества лужения является визуальный метод. Рекомендуется контроль вести визуально с применением оптических приборов с увеличением до 4 и в обоснованных случаях – до 8 крат.</p> <p>При контроле за выполнением операции выводов ЭРИ и печатных плат с установленными ЭРИ от остатков флюса следует обращать особое внимание на состав используемых для этой цели</p>

Содержание работы	Рекомендации по выполнению
	<p>растворителей и требований по температуре сушки печатных плат с ЭРИ после проведения отмывки. Растворитель для очистки выбирается из числа растворителей, приведенных в стандартах и ТУ на конкретные группы изделий, а также с учетом ГОСТ 25486-82 «Требования к содержанию и качеству маркировки».</p> <p>Критерием качества выполнения операции очистки является отсутствие остатков флюса и налета вещества белого цвета, а также отсутствие нарушений корпуса, покрытий и маркировки ЭРИ.</p> <p>Основным методом контроля может являться визуальный. В случае использования канифольных флюсов для контроля качества отмывки целесообразно использовать люминесцентные методы. Концентрация канифоли в очистной жидкости не должна превышать 0,25% по массе в последней ванне, периодичность контроля загрязненности жидкости в ванне – не реже одного раза в неделю.</p> <p>Органические растворители перед применением и периодичности в процессе применения должны проверяться на отсутствие влаги, жировых загрязнений.</p> <p>Максимальная температура среды при сушке платы после очистки определяется наиболее критичным к этой температуре элементом и не должна превышать предельно допустимой температуры, установленной в стандартах и ТУ на ЭРИ (для ИС – не более 70°С, для транзисторов и диодов не более 65°С и т.п.). Допускается производить сушку сжатым воздухом, давление на выходе из сопла при этом должно быть не более 3 атм.</p> <p>С учетом повышенных требований к долговечности создаваемой аппаратуры для КА «Ямал-300К» необходимо исключить все возможные предпосылки к протеканию коррозионных процессов. В связи с этим необходимо обеспечивать и контролировать требования ТД по временным интервалам между технологическими операциями лужения, пайки – очистки – нанесения защитных полимерных покрытий. Если при пайке и лужении использовались некоррозионные или слабокоррозионные флюсы, то время между операциями пайки (лужения) и очисткой должно быть не более 24 ч. В случае применения коррозионных флюсов время между операциями пайки (лужения) и очисткой не должно превышать 1 ч</p>
<p>5. Проверка полноты выполнения поручений</p>	<p>Самостоятельным этапом работ по ТКО является проверка полноты поручений, выданных на предыдущих рассматриваемого оборудования. Необходимо убедиться в наличии доказательных документов, подтверждающих выполнение поручений, и оценить их содержание. В первую очередь необходимо проверить выполнение наиболее значимых поручений, непосредственно влияющих на качество изготовления проверяемого оборудования</p>

Дефекты паяных соединений, причины их возникновения и меры предупреждения

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
	Недостаточный нагрев изделия	Повысить температуру пайки
	Наличие оксидной пленки или других загрязнений	Проверить составы травителей и режимы обработки. При пайке в активных газовых средах проверить наличие среды
1. Припой не смачивает металл в зоне пайки	Недостаточно обеспечен процесс флюсования или воздействия активной среды Большая разница в температурах плавления припоя и флюса Не обеспечена оптимальная шероховатость поверхности	Использовать более активный флюс или газовую среду или увеличить объем используемых флюсоющих средств Подобрать припой и флюс в соответствии с требованиями технологии пайки
	Припой не взаимодействует с основным металлом	Обеспечить состояние поверхности, пригодное к обслуживанию, механическим, химическим или другим путем
	Припой не взаимодействует с основным металлом	В зависимости от сочетания материалов: заменить состав припоя; повысить температуру пайки; нанести на паяемый материал технологическое покрытие
2. Припой не затекает в зазор при наличии хорошего смачивания	Увеличен или уменьшен зазор по сравнению с оптимальным	Подобрать оптимальный зазор и обеспечить его поддержание в процессе пайки
	Не выдержан оптимальный зазор, большая растворимость основного металла в припое	Изменить величину зазора до оптимальной; увеличить температуру или время пайки, увеличить количество припоя
	Не соблюден режим нагрева	Обеспечить равномерный прогрев всей детали до оптимальной температуры
	Недостаточное качество очистки паяемой поверхности	Обеспечить более тщательную очистку поверхности перед пайкой или применять более активные флюсы или среды
3. Не образуются галтели с обратной стороны	Отсутствие выхода для газов из замкнутых полостей в зоне шва	Сделать технологические отверстия
	Недостаточное количество припоя	Использовать в качестве связующего паяльных паст, полимеров, переходящих при нагреве из твердого состояния в газообразное (типа сополимера формальдегида с диаксоланом – СФД)
	Недостаточное количество припоя	Увеличить количество припоя
4. Пористость шва	Высокая температура нагрева или слишком продолжительный нагрев	Сократить время или снизить температуру пайки

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
	<p>Испарение компонентов припоя и флюса</p> <p>Влияние флюса или контролируемых сред</p> <p>В печатных платах вследствие проникновения газов в зону пайки из диэлектрика</p>	<p>При наличии легкоиспаряющихся компонентов в составе припоя (цинк, марганец и т.п.) пайку вести в контролируемой среде при минимальных температуре и выдержке: выбрать способ нагрева, обеспечивающий сокращение времени нагрева для данного изделия</p> <p>Применить пайку в вакууме</p> <p>Для печатных плат с металлизированными отверстиями проверить качество металлизации отверстий (толщина покрытия не менее 25 мкм). Перед пайкой нагревать ПП с целью их дегазации. Увеличение продолжительности пайки ПП повышает вероятность удаления газообразных веществ через расплав припоя</p>
5. Наличие осадков на поверхности печатных плат	<p>Наличие белого осадка связано с составом флюса, режимом пайки и качеством защитных покрытий на печатной плате</p> <p>Наличие темного осадка вследствие неадекватного выбора флюса, несовместимости с составом защитного покрытия плат или в результате неполного удаления остатков флюса с платы</p> <p>Быстрое охлаждение после пайки</p>	<p>Удаление осадка производится сухой щеткой или промывкой водой</p> <p>Удаление остатков флюса (канифоля) сразу после пайки с помощью растворителей. При использовании кислотных флюсов необходима особая тщательная промывка плат сразу после пайки с добавками, нейтрализующими кислотные флюсы</p> <p>Уменьшить скорость охлаждения. Использовать в случае высоких скоростей охлаждения иные средства: нагрев концентрированным источником энергии</p> <p>Подобрать согласованные материалы с близкими коэффициентами термического расширения (КТР). Применять средства (конструктивные или технологические) для обеспечения пайки несогласованных материалов</p>
6. Трещины в паяемом шве	<p>Пайка припоями с широким интервалом кристаллизации</p> <p>Образование хрупких фаз в шве</p>	<p>Применять композитные материалы</p>
7. Смещения и перекосы паяных соединений	<p>Плохое крепление деталей перед пайкой</p>	<p>Пересмотреть выбор припоя и режим пайки</p> <p>Использовать оснастку и приспособления, обеспечивающие надежную фиксацию деталей в процессе нагрева</p>

Вид дефекта	Причины возникновения	Меры предупреждения
8. Трещины в основном металле	Интенсивная диффузия припоя в основной металл Значительная разница в коэффициентах теплового расширения паяемых материалов	Снизить температуру пайки и сократить время нагрева Подобрать согласованные по КТР материалы. Применять конструктивные или технологические приемы для обеспечения пайки несогласованных по КТР материалов. Использовать концентрированные источники нагрева
9. Некачественное состояние поверхности деталей после пайки	Попадание окислительной среды или влаги в камеру пайки Наличие углерода на поверхности деталей	Проверить полноту удаления смазки на паяемых деталях
10. Наплывы или натеки припоя	Деталь недостаточно прогрета при пайке Наличие перемычек на ПП вследствие близкого расположения мест паяк Избыточные наплывы в местах пайки ПП в результате низкой температуры пайки и малой выдержки, несоответствие состава припоя (кристаллизуются в интервале температур), недостаточная смачиваемость поверхности припоем	Повысить температуру пайки в печи или при конвейерной пайке уменьшить скорость движения конвейера Использовать средства (масла), влияющие на физические характеристики расплава Повысить температуру расплава, увеличить время контакта ПП с припоем. Применить механические средства удаления припоя (избытка) путем использования вращающейся щеточной щетки (1400 об/мин), имеющей поступательное движение относительно ПП (2–3 м/с)
11. Шероховатая поверхность паяного шва	Высокая температура или слишком продолжительный нагрев	Снизить температуру или сократить время нагрева
12. Нет электрического контакта впаянного элемента	Ложная пайка, отсутствие сплавления припоя с паяемой поверхностью	Перепать место соединения
13. Высокое электросопротивление	Пайка произошла не по всей поверхности контакта	Повторно облудить коммутирующие устройства и спаять их
14. Включения флюса в паяемом шве	Температура плавления припоя ниже температуры плавления флюса Заполнение паяльного зазора происходит с двух сторон Удельный вес флюса больше удельного веса припоя	Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя Обеспечить одностороннее заполнение зазора припоем Подобрать соответствующий флюс
15. Шлаковые включения в шве	Некачественная подготовка поверхности соединяемых элементов перед пайкой Излишняя продолжительность нагрева в процессе пайки При газовом нагреве использование пламени с избыточным содержанием кислорода	Обеспечить тщательную подготовку поверхности перед пайкой Выдерживать параметры режима пайки Отрегулировать пламя горелки

16. Деформация и коробление паяного изделия	Неравномерность нагрева и охлаждения изделия	Обеспечить равномерные нагрев и охлаждение изделия. Применять нагрев концентрированным источником тепла. Использовать оснастку, фиксирующую взаимное расположение деталей изделия при спайке, пайке и охлаждении
17. Образование перемычек припоя между контактами	Избыток припоя	Нагреть плату раньше, чем компоненты. Снизить температуру пайки либо ее продолжительность. Использовать флюс с меньшей скоростью смачивания. Использовать флюс с меньшим содержанием восстановителей. Использовать флюс с более высокой температурой начала активации

Т а б л и ц а Т.3

Характеристика качества паяных соединений и допускаемых отклонений

Допускаются	Подлежат устранению	Не допускаются
<ul style="list-style-type: none"> – наплавки припоя скругленной формы; – единичные мелкие поры и усадочные раковины; – оплавление защитного покрытия контактных площадок со стороны установки элементов, а также растекание его по печатным проводникам на расстоянии до 5 мм от контактной площадки; – растекание припоя по выводам элементов, при этом расстояние от корпуса до припоя не должно быть менее 0,5 мм 	<ul style="list-style-type: none"> – инородные включения на поверхности припоя; – крупные раковины, трещины; – наплавки припоя в виде выступов, сосулек; – перемычки припоя между контактными площадками, проводниками, выводами; – крупнозернистость поверхности припоя; – недостаток припоя при «скелетной» пайке (отсутствие паяного шва) 	<ul style="list-style-type: none"> – затекание припоя под корпуса элементов с образованием перемычек; – брызги припоя на печатной плате, элементах и т.п. – попадание флюса внутрь негерметичных ЭИ; – затекание припоя под корпуса элементов за пределы контактных площадок ПП с образованием электрического контакта между припоем и корпусом

Приложение У
ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ К ПОСТАВКЕ (DRB)



Цель рассмотрения: проверка соответствия оборудования и (или) СЧ КА требованиям, заданным в контрактах (ТЗ, спецификациях, договорах), и готовности к поставке и установке на изделия более высокого конфигурационного уровня.


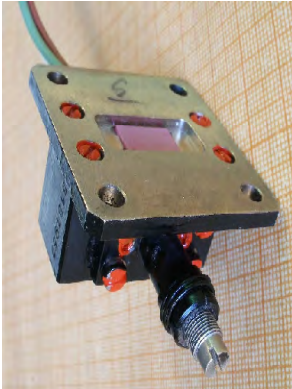

Т а б л и ц а У.1



Содержание работы	Рассматриваемая документация
1. Проверка полноты проведения испытаний изделия в соответствии с ТУ (ПМ) и соответствия результатов испытаний требованиям ТУ на продукцию	ТУ на изделие. Технологический процесс изготавливаемой материальной части. Технологический паспорт изготавливаемой материальной части. Протоколы (акты, отчеты, журналы) проведенных испытаний. Формуляр (паспорт) на изделие
2. Проверка наличия отметок в сопроводительной документации о выполнении и контроле всех операций изготовления на предшествующих этапах. Проверка наличия и правильности оформления сопроводительной документации	Технологический паспорт изготавливаемой материальной части. Формуляр (паспорт) на изделие
3. Проверка выполнения решений и мероприятий по замечаниям, имевшим место при изготовлении данной продукции на предшествующих этапах, выполнение поручений предыдущих рассмотрений	Протоколы предыдущих рассмотрений. Доказательные материалы по закрытию поручений
4. Внешний осмотр изделия на соответствие маркировки, нанесенной на изделие, указанной в сопроводительной документации; отсутствие механических повреждений, загрязнений и следов коррозии на корпусе, штуцерах, соединителях и т.п.; целостность крепежных деталей, их стопорение, отсутствие ослабления; целостность защитных покрытий	ТУ на изделие
5. Проверка соответствия контейнера для транспортирования изделия требованиям ТЗ	ТЗ на создание контейнера. Отчет по результатам испытаний контейнера. Руководство по эксплуатации контейнера
6. Проверка соответствия процесса упаковки прибора в контейнер требованиям ТУ и руководства по эксплуатации контейнера	Руководство по эксплуатации контейнера

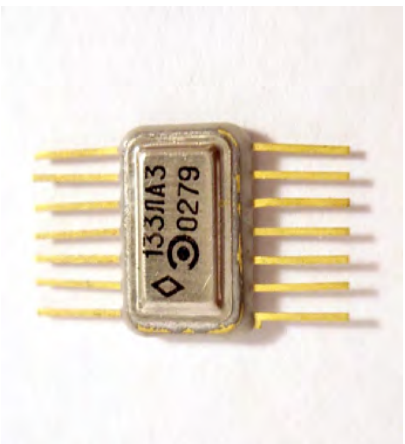

Приложение Ф
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ КЛАССАХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭРИ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В БОРТОВОМ ОБОРУДОВАНИИ КА

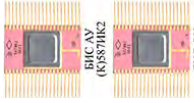


Таблица Ф.1



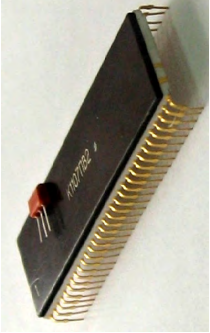
Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Приборы электровакуумные СВЧ			
Магнетроны	Преобразование мощности постоянного или импульсного тока в мощность СВЧ-колебаний	<p>Основные элементы магнетрона: резонаторы, свернутые в кольцевую анодную структуру, термокатод и магнитная система, создающая постоянное магнитное поле вдоль оси прибора. Преобразование переменного и постоянного тока в СВЧ-колебания происходит за счет флукуаций электронов в промежутке между анодом и катодом под действием электрического и магнитного полей</p>	 <p style="text-align: center;">Магнетрон типа МИИ-184</p>
Клистроны	Усиление и генерация электромагнитных СВЧ-колебаний	<p>В стеклянном или металлическом баллоне помещены электроды: катод, ускоряющая сетка и анод (коллектор). Между анодом и ускоряющей сеткой по пути движения электронов расположены два объёмных резонатора, центральная часть которых выполнена в виде сетки. Под действием электрического поля электроны, вылетевшие с катода, после группировки в ступки отдают свою энергию резонатору и при резонансе частоты собственных колебаний электронов и резонатора вызывают незатухающие мощные СВЧ-колебания на выходе прибора</p>	 <p style="text-align: center;">Клистрон типа КУ-371</p>




Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Лампы бегущей волны	Усиление электромагнитных СВЧ-колебаний	Основные элементы: электронная пушка; система фокусировки и формирования электронного потока; замедляющая система; коллектор. Усиление происходит за счет передачи кинетической энергии ступками электронов электромагнитной волне, при движении электронов и волны вдоль замедляющей системы	 <p>ЛБВ кондуктивного типа</p>
Модули СВЧ генераторные, усилительные, преобразовательные, управляющие и многофункциональные	Генерирование, усиление СВЧ-сигнала. Преобразование СВЧ-токов в постоянные или в токи низкой частоты (для их индикации и усиления). Изменение амплитуды, фазы или поляризации в тракте СВЧ-сигнала	Модуль СВЧ является интегрированным устройством, который включает в себя тракт передачи СВЧ-сигнала (волновод, коаксиальный кабель, микрополосковая линия и т.д.) и функциональный элемент (генератор, усилитель, выпрямитель и т.д.), определяющий функции устройства	 <p>Генератор на основе диода Ганна типа МЗ1102-1</p>  <p>Усилитель типа МАУ</p>



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Приборы ферритовые СВЧ			
Вентили	Препятствование прохождению волны от антенны к генератору	Вентиль – это четырехполосник СВЧ, который пропускает электромагнитную волну в одном направлении почти без отражения и ослабления, но поглощает волну, распространяющуюся в обратном направлении	 <p data-bbox="654 255 680 587">Вентиль ферритовый типа 2ID-7</p>
Циркуляторы	Направленная передача энергии электромагнитных СВЧ-колебаний	Принцип действия основан на использовании не взаимного фазового сдвига колебаний в тонких ферритовых пластинах при их попережном подмагничивании. Такие не взаимные фазовые сдвиги с помощью дополнительных устройств позволяют перенаправлять передачу энергии электромагнитных СВЧ-колебаний	 <p data-bbox="1053 273 1079 569">Циркулятор типа ФВЦН1-17</p>
Переключатели	Модулирование амплитуды	Внешнее магнитное поле, воздействующее	



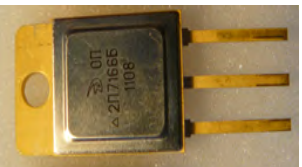
Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
	СВЧ колебаний	на феррит, изменяется по заданному закону, вызывая изменение плоскости поляризации электромагнитной волны в волноводе	Переключатель типа ФПВ1
Фазовращатели	Управление сдвигом фазы (управление диаграммой направленности) СВЧ-колебаний	Управление осуществляется за счет управляющего магнитного поля и изменения магнитной проницаемости феррита, что ведет к изменению электрической длины фазовращателя и изменению фазы сигнала	
Ограничители	Ограничение сигнала по мощности	Принцип работы основан на увеличении потерь на феррите при росте мощности сигнала	
Микросхемы интегральные			
Микросхемы цифровые логические	Преобразование и обработка сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (например, двоичной)	Основным элементом цифровых логических микросхем (ИС) являются транзисторные ключи, которые могут находиться в одном из двух состояний (проводящем и непроводящем) и менять свое состояние под воздействием входных сигналов. Таким образом формируется необходимый сигнал на выходе ИС, соответствующий заданной комбинации входных (управляющих) сигналов	 <p data-bbox="1049 194 1087 637">Цифровая микросхема типа 133LA3</p>
Микросхемы запо-	Запись, хранение и считыва-	ЗУ представляет собой матрицу из элементов	



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
<p>минающих устройств (ЗУ)</p>	<p>ние информации</p>	<p>памяти (в статических ЗУ это триггеры на биполярных или полевых транзисторах, в динамических ЗУ – конденсаторы, в качестве которых используют затвор полевого транзистора). Каждая ячейка памяти хранит один бит информации, т.е. принимает одно из двух возможных состояний – 0 или 1. С помощью двоичной функции кодируется и записывается информация</p>	<p>Микропроцессор INTEL CORE 2 DUO</p>  <p>Микросхемы типа 587ИК</p>
<p>Микросхемы вычислительных средств (включая микропроцессоры, микроЭВМ и др.)</p>	<p>Обработка информации (включая ввод и вывод информации, арифметические и логические операции)</p>	<p>Принцип действия основан на программируемом преобразовании входного сигнала с использованием арифметико-логических устройств, устройств памяти (рабочие регистры) и управления сигналами</p>	 <p>БМК типа H1537XM1</p>
<p>Базовые матричные кристаллы (БМК)</p>	<p>Универсальная заготовка для большой интегральной микросхемы (БИС), конкретные функциональные характеристики которой определяются потребителем</p>	<p>БМК представляют собой БИС без слоев металлизации, т.е. на кристалле БИС разведены логические элементы. БИС с необходимыми функциональными характеристиками получают путем нанесения слоя металлизации, выполняемого изготовителем БМК в соответствии с электрической схемой, задаваемой разработчиком аппаратуры</p>	 <p>БМК типа H1537XM1</p>

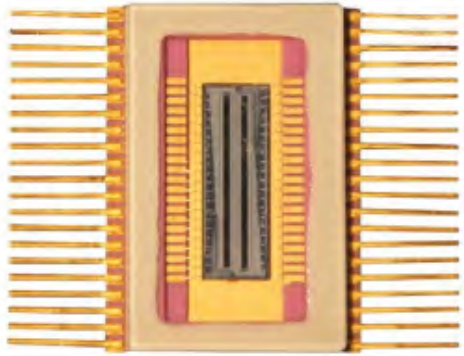
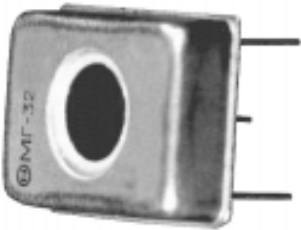
Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС)	Преобразование и обработка сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (после программирования)	В отличие от обычных цифровых микросхем логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования на этапе проектирования изготовителем аппаратуры. Для программирования используются программаторы и отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры	 <p>ПЛИС типа 5576XC1T</p>
Микросхемы аналоговые	Преобразование и обработка сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции	Преобразование сигнала происходит с помощью пассивных и активных элементов схемы. При этом в аналоговой микросхеме выходной сигнал является непрерывной функцией входного	 <p>Микросхема типа 265UB4</p>
Микросхемы интегральные аналоговые (АЦП) и цифроаналоговые	Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и преобразование цифровых сигналов в аналоговые	Преобразование сигналов из аналоговой формы в цифровую обеспечивается путем дискретизации (из непрерывного сигнала выбираются отдельные его значения, соответствующие тактовым моментам времени, следующим через тактовый интервал), квантования (округление значений аналогового напряжения, выбранных в тактовые моменты времени, до ближайшего уровня квантования) и кодирования. Цифроаналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных значений напряжений, соответствующих разрядам входного кода,	 <p>АЦП типа 11071PB2</p>



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
		<p>причем в суммировании участвуют только те эгалонны, для которых в соответствующих рядах стоит единица</p>	
Функциональные устройства			
Источники вторичного электропитания	Обеспечение электропитания нагрузок с требуемыми параметрами	<p>Преобразование параметров переменного или постоянного тока и напряжения, получаемых от первичных источников питания, с использованием усилительно-преобразовательных и других элементов прибора</p>	 <p>ИБЭП серии NFS40</p>
Фильтры помехоподавляющие	Подавление побочных электромагнитных излучений и наводок в цепях электропитания	Создание повышенного электрического сопротивления для высокочастотных электромагнитных сигналов с использованием индуктивных и емкостных элементов	 <p>Сетевой помехоподавляющий фильтр ФП-6</p>
Усилители электрические	Увеличение мощности, напряжения или тока сигнала, подведенного к входу прибора, без существенного искажения его формы	Усиление входного сигнала происходит за счет энергии дополнительного источника, который управляется активным элементом (например, транзистором)	 <p>Цифровой усилитель МР3100D</p>

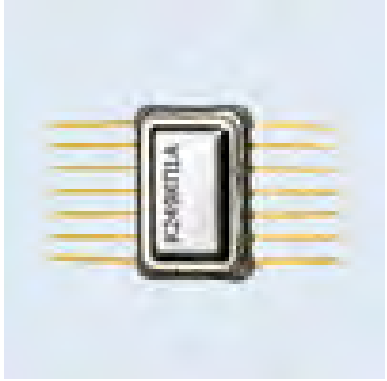

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Преобразователи угла цифровые	Преобразование угла поворота вращающегося объекта в параметр электрического сигнала	<p>Преобразователи содержат последовательно расположенные блок излучения, индикаторный (неподвижный) и измерительный (подвижный) диски, блок фотоприемников.</p> <p>При вращении измерительного диска световой поток блока излучателей модулируется индикаторным и измерительным дисками. При этом фотоприемники вырабатывают электрические сигналы, величина и фазовые соотношения которых определяются взаимным расположением индикаторного и измерительного дисков. Электрические сигналы фотоприемников преобразуются электронным блоком в цифровой код</p>	 <p>Преобразователь угла МП-9 цифровой</p>
Приборы полупроводниковые			
Диоды полупроводниковые выпрямительные и импульсные	Преобразование переменного сигнала в постоянный (выпрямительные диоды) и преобразование переменного сигнала в постоянный с временем восстановления обратного сигнала (время переключения) менее 1 мкс (импульсные диоды)	Преобразование переменного сигнала в постоянный (однонаправленный) происходит за счет наличия в полупроводниковой структуре $p-n$ -перехода области с односторонней проводимостью	 <p>Диод типа 2Д510А</p>

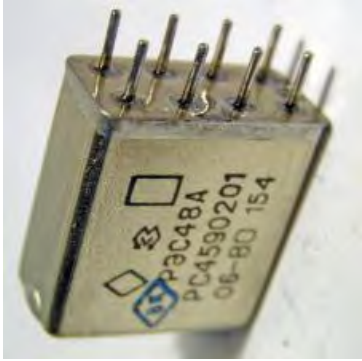

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Стабилитроны	Стабилизация напряжения	Стабилизация напряжения обусловлена эффектом электрического пробоя $p-n$ -перехода при подаче на стабилитрон напряжения, большего, чем напряжение пробоя. Наличие пробоя позволяет при увеличении тока на стабилитроне сохранять фиксированное напряжение стабилизации	 <p>Стабилитрон типа Д818Е ОС</p>
Транзисторы биполярные	Усиление тока и напряжения, выполнение функций ключевого элемента	Усиление по току и напряжению и перевод структуры транзистора из проводящего в непроводящее состояние (и обратно) происходит путем подачи на управляющий электрод электрического сигнала соответствующего уровня и знака, изменяющего состояние двух $p-n$ -переходов транзистора	 <p>Транзистор типа 2Т630</p>
Транзисторы полевые	Усиление сигнала, выполнение функций ключевого элемента	Управление выходным током (сигналом), перевод транзистора из проводящего состояния в непроводящее (и обратно) осуществляются изменением проводимости тоководящего канала путем воздействия электрического поля, поперечного к направлению тока	 <p>Транзистор типа 2П7166Б</p>



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Тиристоры триодные	Переключение сигнала	<p>Переключение сигнала в приборе с тремя $p-n$-переходами осуществляется при помощи дополнительного управляющего электрода, подключенного к области объемного заряда (ОПЗ).</p> <p>Если напряжение в ОПЗ становится больше внешнего напряжения, то ключ открывается, если меньше – закрывается</p>	 <p>Триод типа КУ201К</p>
Приборы фоточувствительные твердотельные			
Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические (фотодиод)	Преобразование энергии света в электрическую энергию	<p>В фотоэлектрических приемниках фотоны оптического излучения прямо взаимодействуют с атомами кристаллической решетки полупроводникового материала, в результате чего освобождаются носители заряда и генерируется электрическое напряжение</p>	 <p>Фотодиод типа ФД-10К</p>



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
<p>Приборы фоточувствительные с переносом заряда</p>	<p>Регистрация изображения</p>	<p>Приборы с переносом заряда – матрицы или линейки фоточувствительных элементов, например МОП-конденсаторов, регистрация изображения в которых осуществляется посредством пропорционального преобразования энергии излучения в электрический заряд, накапливаемый в потенциальных ямах МОП-конденсаторов, с последующим его переносом и считыванием (путем смены напряжения на затворах МОП-конденсаторов) для дальнейшей обработки</p>	 <p>Фоточувствительный прибор типа ФППЗ 8ЛБ</p>
<p>Приемники излучения тепловые</p>	<p>Регистрация излучения инфракрасного диапазона длин волн</p>	<p>Взаимодействие излучения с веществом приводит к появлению температурного поля в чувствительном элементе, которое вызывает изменение электрических свойств материала. По анализу электрических свойств материала определяют длину волны излучения</p>	 <p>Тепловой приемник излучения типа МГ-32</p>




Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Приборы оптоэлектронные			
Излучатели полупроводниковые (светодиод)	Преобразование электрического сигнала в оптический	<p>При пропускании электрического тока через <i>p-n</i>-переход светодиода (в прямом направлении) носители заряда (электроны и дырки) рекомбинируют и излучают фотоны (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой)</p>	 <p>Светодиод типа ЗЛП119А</p>
Оптопары	Оптрон (в частном случае оптопара) выполняет функцию связи в электрической цепи с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входных и выходных электрических цепей	<p>Принцип действия основан на двойном преобразовании энергии. Сначала электрическая энергия преобразуется в оптическую с помощью светодиода, а затем оптическая энергия преобразуется в электрическую с помощью фотодиода</p>	 <p>Оптопара типа ЗОДП29А ОСМ</p>



Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Схемы интегральные оптоэлектронные	Схемы интегральные оптоэлектронные выполняют те же функции, что и обычные ИС, т.е. осуществляют преобразование входных сигналов	<p>Реализация необходимых функций осуществляется при помощи электронных схем, изготовленных на полупроводниковой пластине, с использованием, в основном, транзисторов. Отличием оптоэлектронных ИМС от обычных является использование оптической связи (оптопар, оптронов) между отдельными узлами или компонентами с целью электрической изоляции их друг от друга</p>	 <p>Оптоэлектронная ИС типа 249КП</p>
Коммутаторы аналоговых сигналов	Переключение сигналов от измерительных датчиков, ключей аналоговых сигналов, модуляторов слабых сигналов постоянного тока	<p>Электрическое управление состоянием контактов (включено-выключено) осуществляется с помощью светового потока. В оптоэлектронных коммутаторах аналоговых сигналов используется гальваническая развязка с управляющими и коммутируемыми цепями</p>	 <p>Аналоговый коммутатор типа 591KH2</p>




Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Реле электромагнитные слаботочные (поляризованные, неполяризованные и др.)	Коммутация электрических цепей постоянного и переменного тока	Реле состоит из четырех основных конструктивных узлов: неподвижной части магнитной системы с сердечником, обмотки и подвижной части – якоря и контактной системы. Коммутация цепей осуществляется путем перемещения якоря контактной системы под воздействием магнитного поля, создаваемого обмоткой управления	 <p>Реле РС48А</p>
Контакты магнитоуправляемые герметизированные	Коммутация активных и индуктивных электрических цепей	Коммутация цепей осуществляется замыканием ферромагнитных контактов, расположенных в герметизированном корпусе, при их намагничивании под действием внешнего магнитного поля, создаваемого, например, соленоидом, электромагнитом или постоянным магнитом. Взаимодействие разноименно намагниченных контактов вызывает их деформацию и замыкание. При снятии воздействия внешнего магнитного поля силы упругости возвращают контакты в исходное положение и цепь размыкается	 <p>Герметизированный магнитоуправляемый контакт (геркон) КЭМ-3</p>

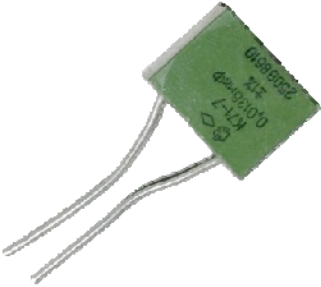

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Резонаторы пьезоэлектрические	Генерирование напряжения постоянной частоты. Генерирование гармонических колебаний	<p>Приборы пьезоэлектрические</p> <p>Пьезорезонатор состоит из пьезоэлемента с двумя обкладками (электродами). При воздействии внешнего механического напряжения на пьезоэлемент на обкладках возникает электрическое напряжение, которое вызывает ток во внешней цепи. При совпадении частоты внешнего электрического поля и частоты собственных механических колебаний пьезоэлемента возникает резонанс, который слабо зависит от внешних условий. Резонансные свойства пьезоэлемента используются для стабилизации частоты.</p> <p>Для генерирования гармонических колебаний используется обратный пьезоэффект, т.е. подача электрического напряжения на обкладки (электроды) вызывает гармонические колебания пьезоэлемента</p>	 <p>Резонаторы пьезоэлектрические типа PG07 и PG-08</p>
Генераторы пьезоэлектрические	Генерирование переменного напряжения с постоянной частотой	<p>К пьезоэлектрической пластине присоединены электроды электронного генератора высокой частоты. В такт изменениям частоты будет колебаться пластинка и в окружающей среде будут возникать ультразвуковые волны. На пути распространения волны располагается приемная пластинка, в которой возникают электрические заряды. Заряды затем усиливаются и регистрируются на индикаторном приборе. В пьезоэлектрическом генераторе используются пьезоэлектрические резонаторы</p>	 <p>Генератор пьезоэлектрический типа GK27</p>

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Фильтры пьезоэлектрические	Подавление определенного спектра сигналов	<p>В пьезоэлектрическом фильтре используются два преобразователя с использованием пьезоэлемента и механический резонатор. Сначала электронный сигнал попадает в механический. Полученный сигнал попадает в резонатор, и далее проходит сигнал только с частотой резонанса. Далее отфильтрованный механический сигнал преобразуется в электронный</p>	 <p>Фильтр пьезоэлектрический типа ФП2П4</p>
Элементы пьезоэлектрические	Преобразование механического напряжения в электрическое и наоборот	<p>Преобразование механической энергии в электрическую обусловлено прямым пьезоэлектрическим эффектом. Прямой пьезоэлектрический эффект возникает в пьезоэлементе, имеющем механический вход и электрический выход. Под действием внешних механических сил, приложенных к пьезоэлементу, на его поверхности образуются электрические заряды. Преобразование электрической энергии в механическую обусловлено обратным пьезоэлектрическим эффектом. Обратный пьезоэлектрический эффект возникает в пьезоэлементе, имеющем электрический вход и механический выход. Под действием внешнего электрического напряжения, приложенного к пьезоэлементу, он деформируется</p>	 <p>Пьезоэлемент типа АW4Е34</p>




Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Машины электрические малой мощности			
Электродвигатели постоянного тока коллекторные	Преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию вращения	Основными частями электродвигателя (ЭД) являются: статор (неподвижный элемент, создающий магнитное поле), ротор (подвижный вращающийся элемент) и щеточно-коллекторный узел (выполняет функцию датчика положения ротора и переключателя тока в обмотках). Вращающая ротор сила образуется от взаимодействия тока в обмотке ротора с магнитным полем статора	 <p>Коллекторный электродвигатель постоянного тока Р2МО</p>
Электродвигатели со стабилизацией частоты вращения	Работа в устройствах автоматики без использования внешних цепей обратной связи для стабилизации частоты вращения	Для стабилизации частоты вращения ротора используется встроенный центробежный контактный регулятор. Применяются также датчики частоты вращения, основанные на оптических (оптопара) и магнитных (читающая магнитная головка) физических принципах действия	 <p>Электродвигатель ДПМ-30-НЗ-01</p>
Электродвигатели постоянного тока бесконтактные	Решают те же задачи, что и ЭД постоянного тока коллекторные, но не содержат щеточно-коллекторного узла	Отличаются от коллекторного ЭД тем, что вращающий момент образуется взаимодействием вращающегося магнитного поля статора (создается специальным коммутатором, поочередно в определенной последовательности запитывающим фазы ЭД) с полем постоянных магнитов ротора	 <p>Электродвигатель постоянного тока ДБУ</p>




Группы ЭРИ	Электродвигатели шаговые	Функциональное назначение	Используются в приводах механизмов, работающих в старт-стопном режиме, где необходимо точное позиционирование углового положения ротора	Устройство и принцип работы	С помощью электронного коммутатора вы- рабатываются импульсы напряжения, кото- рые подаются на обмотки управления, рас- положенные на статоре шагового двигателя. В зависимости от последовательности воз- буждения обмоток управления происходит то или иное дискретное изменение магнит- ного поля в рабочем зазоре двигателя. При угловом перемещении оси магнитного поля обмоток управления шагового двигателя его ротор дискретно поворачивается вслед за магнитным полем	Пример внешнего вида ЭРИ	 <p>Шаговый электродвигатель NEMA 23</p>
Резисторы и конденсаторы							
Резисторы постоянные (проволочные, фольговые)	Ограничение тока в электрических цепях	Принцип действия основан на свойстве то- копроводящих материалов оказывать сопро- тивление проходящему электрическому току	 <p>Резистор постоянного проволочного типа C5-35B</p>				

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Резисторы переменные	Регулировка величины тока в электрических цепях	Переменные резисторы отличаются от постоянных наличием третьего вывода — движка, который представляет собой подпружиненный ползунок, который может механически передвигаться по резистивному слою. Соответственно, в одном крайнем положении движка сопротивление между его выводом и одним из выводов резистивного слоя равно нулю, в другом — максимуму, соответствующему номинальному сопротивлению	 <p>Резистор переменный R16K1-A100kOhm</p>
Терморезисторы	Контроль изменения температуры в устройствах автоматики. Компенсация изменения параметров электрической цепи устройств автоматики при изменении температуры	Терморезистор представляет собой полупроводниковый прибор (его изготавливают из полупроводниковых материалов с большим отрицательным температурным коэффициентом), в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводников от температуры	 <p>Терморезистор прямого подогрева ТРП168-01</p>
Варисторы	Защита от перенапряжения элементов оборудования систем автоматики	Выходная характеристика варистора имеет ярко выраженный участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением — при резком увеличении приложенного электрического напряжения внутреннее сопротивление прибора уменьшается до долей ома. Таким образом, при возникновении перегрузки прибор, включаемый параллельно нагрузке, шунтирует нагрузку и защищает ее	 <p>Варистор s14 k1000</p>

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
<p>Конденсаторы постоянной емкости (керамические, пленочные, оксидно-электролитические и др.)</p>	<p>Применяются в колебательных контурах для разделения электрических цепей с различной частотой, в сглаживающих и резонансных фильтрах, для связи отдельных цепей переменного тока, в качестве накопителей электрической энергии (интегрирующие цепи), в емкостных делителях напряжения</p>	<p>Накопление электрического заряда на пластинах-электродах, изолированных между собой диэлектриком</p>	 <p>Конденсатор постоянной емкости K71-7</p>
<p>Конденсаторы подстроечные</p>	<p>Применяются в цепях, ёмкость которых должна точно устанавливаться при настройке и не изменяться в процессе эксплуатации, например для настройки контуров с фиксированной частотой, для подстройки начальной частоты диапазонов контуров, в цепях связи</p>	<p>Принцип работы таких конденсаторов тот же, что и конденсаторов постоянной емкости. Отличие в том, что пластины подвижны и могут перемещаться относительно одна другой, меняя емкость конденсатора</p>	 <p>Конденсатор подстроечный SMD TZB4P400BV10</p>

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Конденсаторы и фильтры помеходавляющие	Снижение восприимчивости аппаратуры к внешним электромагнитным полям и импульсным сигналам		 <p>Помехоподавляющие фильтры Б24, Б25 и Б26</p>
Моточные изделия			
Трансформаторы (преобразователи напряжения, согласующие, импульсные и др.)	Изменение параметров переменного тока	<p>На первичную обмотку трансформатора подается напряжение, которое создает переменное магнитное поле в магнитопроводе. Магнитный поток, взаимодействуя с вторичной обмоткой, создает ЭДС индукции, величина которой определяется числом витков вторичной обмотки</p>	 <p>Трансформатор ISDN (RM6)</p>

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Дроссели (высокочастотные, дроссели фильтров выпрямителей)	Подавление помех, сглаживание пульсаций и др.	Прибор использует свойство индуктивности менять сопротивление при изменении частоты протекающего тока	 <p>Дроссель Д13-10В</p>
Источники тока химические			
Элементы первичные и батареи на их основе	Источник питания, не имеющий функции перезарядки, либо имеющий очень низкую эффективность перезарядки	Принцип действия химических источников тока основан на преобразовании энергии химической реакции, протекающей в источнике тока, в электрическую энергию	 <p>Литиевый элемент типа ER20С</p>
Аккумуляторы и батареи на их основе	Перезаряжаемый источник питания	Электрический ток образуется в замкнутой цепи батареи за счет разделения зарядов при протекании окислительно-восстановительной химической реакции. Работоспособность аккумулятора восстанавливается путем зарядки, т.е. пропуском электрического тока в направлении, обратном направлению тока при разряде	 <p>Литий-ионные аккумуляторные батареи</p>

Группы ЭРИ	Функциональное назначение	Устройство и принцип работы	Пример внешнего вида ЭРИ
Соединители низкочастотные цилиндрические	Предназначены для механического соединения и разъемного соединения низкочастотных электрических цепей переменного тока или цепей постоянного тока	<p style="text-align: center;">Соединители электрические</p> <p>Данный электрический соединитель имеет с контактной стороны торец изолятора цилиндрической формы</p>	 <p>Соединители электрические низкочастотные цилиндрические типа 9P</p>
Соединители прямоугольные для объемного и печатного монтажа	Предназначены для механического соединения и разъемного соединения электрических цепей переменного или постоянного тока в устройствах, выполненных с использованием технологии объемного или печатного монтажа	Данный электрический соединитель имеет с контактной стороны торец изолятора прямоугольной или трапециевидальной формы и приспособлен к установке в устройстве печатного или объемного монтажа	 <p>Соединители электрические низкочастотные прямоугольные типа ГРПМЗ, ГРППЗ</p>
Соединители радиочастотные	Предназначены для радиочастотных линий передачи сигналов трактов радиосвязи	Имеют контактную систему, позволяющую осуществлять соединение и разъединение коаксиальных кабелей	 <p>Соединитель радиочастотный СР-50-130ПВ</p>

ЛИТЕРАТУРА

1. *Севастьянов Н.Н.* Особенности космического производства // Стандарт. 2011. № 8(103).
2. *Севастьянов Н.Н.* Система спутниковой связи и телевидения «Ямал»: состояние и перспективы // Новые высокие технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи. 2000. Т. 10, кн. 3.
3. *Севастьянов Н.Н., Верхотуров В.И.* Управление техническими рисками в проектах создания КА спутниковых систем связи // Вестник МАИ. 2005. Т. 12, № 2. С. 91–100.
4. *Сифоров В.И.* О методах расчета надежности систем, содержащих большое число элементов // Изв. АН СССР. 1954. № 6.
5. *Севастьянов Н.Н., Верхотуров В.И., Андреев А.И.* Система повышения качества элементной базы аппаратуры негерметичных космических аппаратов с длительными сроками активного функционирования // Тезисы докладов международной конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий». М. : Радио и связь, 2004. Ч. 1. С. 82–84.
6. *Севастьянов Н.Н., Верхотуров В.И., Борисов Ю.А., Самсонов С.Г., Лютецкий Ю.В.* Методика оценки интенсивности одиночных сбоев в СБИС ОЗУ по результатам эксплуатации в составе аппаратуры КА // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1–2. С. 104–109.
7. *Положение* о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) космических комплексов (Положение РК-98-КТ). Утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 22 июля 1998 г. № 819-31.
8. *Положение* о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов (Положение РК-11-КТ). Введено в действие приказом руководителя Роскосмоса от 22.12.2011 № 232.
9. *Вопросы* надежности радиоэлектронной аппаратуры / пер. с англ., под ред. И.И. Морозова. М. : Советское радио, 1959.
10. *Павлыченко А.Д., Сафронов Г.Д., Однодушинов А.В., Протасов А.И., Голобокий И.Р.* Надежность радиоэлектронной аппаратуры / под общ. ред. А.С. Груничева. М. : Советское радио, 1963.
11. *Сотсков Б.С.* Физика отказов и определение интенсивности отказов // О надежности сложных технических систем / под ред. А.И. Берга, Н.Г. Бруевича, Б.В. Гнеденко, Т.А. Голинкевича. М. : Советское радио, 1966.
12. *Даммер А., Гриффин Б.* Испытание радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий / пер. с англ., под ред. Б.Е. Бердичевского. М. : Энергия, 1965.
13. *Кибернетику* – на службу коммунизму : сб. статей / под ред. А.И. Берга, Н.Г. Бруевича, Б.В. Гнеденко. М. : Энергия, 1964. Т. 2.
14. *Дружинин Г.В.* Надежность устройств автоматики. М. : Энергия, 1964.
15. *Астафьев А.В.* Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М. : Энергия, 1965.

16. *Кузнецов В.А.* Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М. : Энергия, 1965.
17. *Голинкевич Т.А.* Оценка надежности сложных технических систем в процессе их производства // О надежности сложных технических систем / под ред. А.И. Берга, Н.Г. Бруевича, Б.В. Гнеденко, Т.А. Голинкевича. М. : Советское радио, 1966.
18. *Половко А.М.* Основы теории надежности. М. : Наука, 1964.
19. *Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б.* Модели отказов / под ред. Б.В. Гнеденко. М. : Советское радио, 1966.
20. *Хевиленд Р.* Инженерная надежность и расчет на долговечность / пер. с англ. М. : Энергия, 1966.
21. *Перроте А.И., Карташев Г.Д., Цветаев К.Н.* Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. М. : Советское радио, 1968.
22. *Графодатский О.С., Ислаев Ш.Н.* Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. Томск : РАСКО, 1993. 208 с.
23. *Андреев А.И., Хара Ю.В., Плаксин А.А.* Хрональный эффект – новый воздействующий фактор на РЭА // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 2, 3.
24. *Надежность и эффективность в технике : справочник / под ред. В.С. Авдеевского и др. Т. 5 : Проектный анализ надежности.* М. : Машиностроение, 1988.
25. *Надежность и эффективность в технике : справочник / под ред. В.С. Авдеевского и др. Т. 6 : Экспериментальная обработка и испытания.* М. : Машиностроение, 1989.
26. *Надежность электрорадиоизделий : справочник / ФГУ «22ЦНИИ МО РФ» совместно с ОАО «РНИИ «Электронстандарт» и ОАО «Стандартэлектро».* М. : ФГУ 22ЦНИИИ МО РФ, 2006.
27. *Надежность и эффективность в технике : справочник / под ред. В.С. Авдеевского и др. Т. 10 : Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности.* М. : Машиностроение, 1990.
28. MIL-HDBK-217F с дополнениями 1 и 2. Прогнозирование надежности электронного оборудования : справочник. США, 1995.
29. Автоматизированная система расчета надежности (АСРН). Программа для компьютера / ФГУ «22 ЦНИИ МО РФ» совместно с ОАО «РНИИ «Электронстандарт». М. : ФГУ 22 ЦНИИИ МО РФ, 2006.
30. ECSS-Q-30-11 Гарантирование космической продукции. Снижение нагрузок – ЕЕЕ комплектующие. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2008.
31. ECSS-M10С Планирование проекта и исполнение. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2008.
32. *Андреев А.И., Баюков А.В.* Проблема надежности элементов радиоэлектроники (ретроспективный анализ) // Радиотехника. 1995. № 4–5.
33. *Сретенский В.Н.* Динамика роста сложности в радиоэлектронике и проблема миниатюризации // Радиотехника. 1995. № 4–5.
34. *Чернышев А.А.* Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М. : Радио и связь, 1988. 256 с.

35. ГОСТ 27.002–89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения / Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. М., 1989.
36. *Шишинок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л.* Основы теории надежности и эксплуатации техники. М. : Советское радио, 1964.
37. *Веденеев Ю.З., Груничев А.С., Куренков М.А., Чепиженко А.З.* Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности // Надежность и эффективность в технике. М. : Машиностроение, 1990. Т. 10.
38. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. М. : Госстандарт России, 1995.
39. *Данилин Н.С., Нуров Ю.Л.* Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М. : Изд-во стандартов, 1991. 176 с.
40. *Горлов М.И., Данилин Н.С.* Физические основы надежности интегральных микросхем. М., 2008. 402 с.
41. *Севастьянов Н.Н., Верхотуров В.И., Андреев А.И.* Управление техническими рисками в проектах создания КА с длительными сроками активного функционирования // Тезисы докладов на 9-й Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация». М. : Изд-во МАИ, 2004. С. 9–11.
42. *Демочко Ю.А., Лебедев К.В.* Физические аспекты надежности изделий микроэлектроники // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. 1985. Вып. 6 (117).
43. РДВ 319.01.09–94 (ред. 2-2000) Руководство по оценке правильности применения электрорадиоизделий в аппаратуре // Технический комитет по стандартизации. 2000. № 319.
44. РДВ 319.01.07–94 (ред. 2-2000) Аппаратура, приборы, устройства, оборудование. Принципы применения математического моделирования при проектировании // Технический комитет по стандартизации. 2000. № 319.
45. *Андреев А.И., Борисов А.А.* Применение методов и систем математического моделирования в задачах технической экспертизы разработок РЭС // Тезисы докладов международной конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий». М. : Радио и связь, 2000. Ч. 6. С. 118–121.
46. РДВ 319.01.11–95 Аппаратура, приборы, устройства, оборудование. Методы технологических тренировок // Технический комитет по стандартизации. 1995. № 319.
47. *Кофанов Ю.Н.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. М. : Радио и связь, 1991.
48. *Бережной В.П., Дубицкий Л.Г.* Выявление причин отказов РЭА. М. : Радио и связь, 1983.
49. *Андреев А.И.* Система анализа причин отказов изделий радиоэлектроники // Технологическое оборудование и материалы. 1997. Т. 8–9.
50. *Андреев А.И.* Основы обеспечения и оценки надежности радиоэлектронных средств : учеб. пособие. М. : МИРЭА, 2000. 125 с.
51. *Андреев А.И., Демочко Ю.А., Русаков Ю.М., Торопов Ю.А.* Надежность радиоэлектронных средств. СПб., 2001. 195 с.

52. *Андреев А.И., Катеринич И.И., Попов В.Д.* Надежность и контроль качества интегральных микросхем (конспект лекций). М. : МИФИ, 2004. 120 с.
53. РД 50-621–86 Аппаратура радиоэлектронная и электрорадиоизделия. Классификация методов анализа отказов. М. : Изд-во стандартов, 1987.
54. *Торопов Ю.А.* База знаний по физике отказов и проблема качества и надежности радиоэлектронных средств // Информатика-Машиностроение. 1998. № 3(21).
55. *Андреев А.И., Жаднов В.В., Кофанов Ю.Н.* Виды и причины отказов РЭС : учеб. пособие. М. : МГИЭМ, 1995. 85 с.
56. *Демочко Ю.А., Торопов Ю.А.* Физическое и математическое моделирование при анализе отказов ЭРИ из-за электрических перегрузок // Труды II Всесоюзной конференции «Моделирование отказов и имитация на ЭВМ статистических испытаний изделий электронной техники». Суздаль, 1985.
57. *Демочко Ю.А., Торопов Ю.А.* Экспериментальная оценка характеристик p - n -перехода при пробое импульсными электрическими перегрузками // Материалы семинара «Причины, механизмы отказов РЭА и ЭРИ, методы их анализа и предотвращения». М., 1987. Вып. 2. С. 15–27.
58. *Демочко Ю.А., Коломиец В.И., Мащенко В.И.* Исследование механизма катодной электролитической коррозии ИС 564 серии // Материалы семинара «Причины, механизмы отказов РЭА и ЭРИ, методы их анализа и предотвращения». М., 1987. Вып. 2. С. 106–117.
59. *Данилин Н.С., Белослудцев С.А.* Стратегия обеспечения качества современной электронной компонентной базы новых российских космических разработок. М. : МАКС Пресс, 2007. 80 с.
60. *Андреев А.И., Баринов П.Е.* Влияние способов герметизации и материалов внутренних элементов ИС на состояние газовой среды в подкорпусном объеме // Технологическое оборудование и материалы. 1998. № 5.
61. *Ионизирующее* излучение космического пространства и его воздействие на бортовую аппаратуру КА. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. 256 с.
62. ГОСТ РВ 20.57.304–98 Аппаратура, приборы, устройства, оборудование. Методы оценки соответствия требованиям к надежности. М. : Госстандарт России, 1998.
63. ОСТ 92.5100–2002 Аппаратура космических аппаратов. Общие технические условия. М., 2002. 160 с.
64. *Севастьянов Н.Н., Андреев А.И.* Тезисы доклада «Методология управления надежностью КА систем спутниковой связи» на семинаре «Качество и надежность ракетно-космической техники и применяемой электронной компонентной базы. Новые задачи, перспективные проекты, проблемы, пути решения». 2014. (НОУ ДПО «ИПК Машприбор»).
65. СТП ГК 12.01.07–2013 СМК Методология управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации, ОАО «Газпром космические системы». 2013. 119 с.
66. SAE AS5553A Фальсифицированные / поддельные электронные компоненты, предотвращение, обнаружение, смягчение последствий и утилизация. Ассоциация инженеров-транспортников США, 2012.

67. GEIA TB-0003 Снижение рисков проникновения контрафактных компонентов и материалов. США, 2009.
68. AS-6081 Фальсифицированные / поддельные электронные компоненты. Избежание, обнаружение, смягчение последствий и распоряжение. Дистрибьюторы. США, 2012.
69. AS-6174 Поддельные компоненты и материалы. Обеспечение приобретения подлинных и соответствующих компонентов и материалов. США, 2012.
70. ECSS-Q-00 Гарантия продукции космического проекта. Политика и принципы. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2008.
71. ECSS-Q-20B Гарантия продукции космического проекта. Гарантия качества. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2008.
72. ECSS-Q-30B Гарантия продукции космического проекта. Надежность. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2002.
73. ECSS-Q-40 Гарантия продукции космического проекта. Безопасность. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 1997.
74. ECSS-Q-20-07A Гарантия продукции космического проекта. Гарантия качества для испытательных центров. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2002.
75. ECSS-Q-20-09B Гарантия продукции космического проекта. Система контроля несоответствий. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2002.
76. ECSS-Q-60-11A Гарантия продукции космического проекта. Комплектующие ЭРИ. Облегченные режимы. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2004.
77. ECSS-Q-30-02A Гарантия продукции космического проекта. Анализ видов последствий и критичности отказов (АВПКО). Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2001.
78. ECSS-Q-70-71A Гарантия продукции космического проекта. Данные для выбора материалов и процессов космического применения. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2004.
79. ECSS-M-40A Управление конфигурацией. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 1996.
80. ECSS-M-50A Управление данными / документацией. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2008.
81. ECSS-Q-60-01A Гарантия продукции космического проекта. Перечень разрешенных комплектующих европейского производства. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 1996.
82. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М. : Госстандарт России, 1995.
83. ECSS-Q-30-01 Гарантия продукции космического проекта. Анализ наихудшего случая. Европейское сообщество по стандартизации в космической отрасли, 2005.
84. *Каннингхем К., Кокс В.* Методы обеспечения ремонтпригодности. М. : Сов. радио, 1978. 312 с.
85. *Штиллер В.* Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М. : Мир, 2000. 176 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	8
ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	10
ГЛАВА 1. НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ.....	10
ГЛАВА 2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ	18
2.1. Обзор основных факторов	18
2.2. Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность электрорадиоизделий (ЭРИ).....	20
2.3. Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность РЭС	24
2.4. Источники электрических перегрузок и их влияние на надежность РЭС	27
2.4.1. Разряды статического и наведенного электричества	28
2.4.2. Электрические перегрузки, связанные с недостатками разработки РЭС.....	31
2.4.3. Электрические перегрузки, связанные с производством и испытаниями бортовых РЭС	32
2.5. Факторы радиационной природы	35
Контрольные вопросы	36
ГЛАВА 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭРИ.....	37
3.1. Квалификация ЭРИ по надежности.....	39
3.2. Дополнительные испытания ЭРИ.....	44
Контрольные вопросы	53
ГЛАВА 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	54
4.1. Методы резервирования	56
4.2. Проектные анализы надежности	65
4.3. Экспертиза правильности применения ЭРИ	71
4.3.1. Процесс проектирования РЭС с применением САПР	75
Контрольные вопросы	81
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА ЭТАПАХ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЭС	82

5.1. Наземная экспериментальная отработка	82
5.1.1. Общие сведения	82
5.1.2. Особенности зарубежной системы наземной экспериментальной отработки	92
5.2. Технологическая тренировка РЭС и их составных частей	96
5.2.1. Оценка числа дефектов аппаратуры и её составных частей	97
5.2.2. Выбор режимов технологической тренировки.....	98
5.2.3. Выбор методов технологической тренировки.....	101
Контрольные вопросы	103
ГЛАВА 6. СИСТЕМНЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА ПРИЧИН ОТКАЗОВ.....	104
6.1. Принципы построения систем анализа отказов	106
6.2. Алгоритмы и процедуры проведения анализа отказов	108
6.3. Отказы интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, связанные с утечками, пробоями и пережогами.....	113
6.4. Коррозионные отказы интегральных микросхем и полупроводниковых приборов	127
Контрольные вопросы	139
ЧАСТЬ 2. МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ КА.....	140
ГЛАВА 7. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ	140
7.1. Введение.....	140
7.2. Принципы организации взаимодействия заказчика и исполнителей проекта	143
7.3. Организация процедур рассмотрений	148
Контрольные вопросы	152
ГЛАВА 8. ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЮ НА ЭТАПАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТОВ.....	153
8.1. Рассмотрение системных требований (SRR)	153
8.2. Рассмотрение состояния квалификации оборудования (EQSR) и бортовых систем	154
8.3. Предварительное рассмотрение проекта (PDR)	156
8.4. Рассмотрение готовности к изготовлению оборудования (MRR)	158
8.5. Критическое рассмотрение проекта (CDR)	162
8.6. Рассмотрение в точке контроля обязательной (MIP).....	170
8.7. Рассмотрение готовности к испытаниям (TRR).....	173

8.8. Рассмотрение результатов испытаний (TRB).....	173
8.9. Рассмотрение готовности к поставке (DRB).....	174
8.10. Рассмотрение завершения изготовления КА (FMCR), готовности к запуску (LRR), результатов лётных испытаний и заключительная приемка КА на орбите (FQR).....	176
Контрольные вопросы	176
<i>Приложение А. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ</i>	179
<i>Приложение Б. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ (EQSR)</i>	184
<i>Приложение В. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАССМОТРЕНИЮ КВАЛИФИКАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ КА</i>	187
<i>Приложение Г. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ СОСТОЯНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СИСТЕМ</i>	192
<i>Приложение Д. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАССМОТРЕНИЯ ПРОЕКТА (PDR)</i>	194
<i>Приложение Е. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ (MRR)</i>	197
<i>Приложение Ж. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАССМОТРЕНИЮ ГОТОВНОСТИ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ</i>	199
<i>Приложение З. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ ИТЦ</i>	204
<i>Приложение И. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ ГОТОВНОСТИ ИТЦ</i>	205
<i>Приложение К. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭРИ В ИТЦ</i>	207
<i>Приложение Л. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА КРИТИЧЕСКОГО РАССМОТРЕНИЯ ПРОЕКТА (CDR)</i>	208
<i>Приложение М. ПРОГРАММА ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРИ</i>	211
<i>Приложение Н. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ ПРАВИЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭРИ</i>	213
<i>Приложение О. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ РАСЧЕТОВ И АНАЛИЗОВ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ</i>	217

<i>Приложение П. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ АНАЛИЗА СТОЙКОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПО ДОЗОВЫМ ЭФФЕКТАМ</i>	219
<i>Приложение Р. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕРКЕ АНАЛИЗА СТОЙКОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПО ЭФФЕКТАМ ОДИНОЧНЫХ СОБЫТИЙ.....</i>	221
<i>Приложение С. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЙ В ТКО (MIP)</i>	225
<i>Приложение Т. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ КА В ТКО (MIP)</i>	226
<i>Приложение У. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНИЯ ГОТОВНОСТИ К ПОСТАВКЕ (DRB).....</i>	234
<i>Приложение Ф. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ КЛАССАХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭРИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В БОРТОВОМ ОБОРУДОВАНИИ КА.....</i>	235
<i>ЛИТЕРАТУРА.....</i>	258

Учебное издание

**Николай Николаевич Севастьянов
Александр Иванович Андреев**

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Учебное пособие

Ведущий редактор И.В. Гоменюк
Редактор К.Г. Шилько
Компьютерная верстка Р.В. Страхов, А.И. Лелююр
Дизайн обложки Р.В. Страхов, Л.Д. Кривцова

Подписано к печати 28.04.2015 г. Формат 70×100¹/₁₆.

Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 21,6.

Тираж 100 экз. Заказ № 1006.

Отпечатано на оборудовании
Издательского Дома
Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
Тел. 8+(382-2)-53-15-28
Сайт: <http://publish.tsu.ru>
E-mail: rio.tsu@mail.ru

ISBN 978-5-94621-460-5



9 785946 214605



Севастьянов Николай Николаевич

Окончил МФТИ (факультет аэрофизики и космических исследований) в 1984 году. Кандидат технических наук. Заслуженный конструктор Российской Федерации. Лауреат премии Президента РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области образования, Почетный радист, Почетный работник ОАО «Газпром», член-корреспондент Международной академии астронавтики, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Генеральный конструктор системы спутниковой связи «Ямал». Генеральный конструктор ОАО «Газпром космические системы». Заведующий кафедрой «Промышленные космические системы» Томского государственного университета.



Андреев Александр Иванович

Окончил МЛТИ (факультет электроники и счетно-решающей техники) в 1970 г. и МИЭМ (факультет прикладной математики) в 1974 г. Кандидат технических наук. Лауреат Государственной премии РФ и Премии Правительства РФ. Директор Центра надежности космических комплексов ОАО «Газпром космические системы».