ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 60.0.7.3— 2020

РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА» (ООО «НИИ «АСОНИКА»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 141 «Робототехника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2020 г. № 1402-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2021

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Термины, определения и сокращения 1
3 Общие положения 1
4 Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК, основанный на комплексной модели надежности БЭ РТК 2
Приложение А (справочное) Перечни параметров электрорадиоизделий для некоторых форм карт рабочих режимов 13
Приложение Б (справочное) Пример комплексного анализа надежности 20
Библиография 25

Введение

Целью стандартов комплекса «Роботы и робототехнические устройства» является повышение интероперабельности роботов и их компонентов, а также снижение затрат на их разработку, производство и обслуживание за счет стандартизации и унификации процессов, интерфейсов и параметров.

Стандарты комплекса «Роботы и робототехнические устройства» представляют собой совокупность отдельно издаваемых стандартов. Стандарты данного комплекса относятся к одной из следующих тематических групп: «Общие положения, основные понятия, термины и определения», «Технические и эксплуатационные характеристики», «Безопасность», «Виды и методы испытаний», «Механические интерфейсы», «Электрические интерфейсы», «Коммуникационные интерфейсы», «Методы моделирования и программирования», «Методы построения траектории движения (навигация)», «Конструктивные элементы». Стандарты любой тематической группы могут относиться как ко всем роботам и робототехническим устройствам, так и к отдельным группам объектов стандартизации: промышленным роботам в целом, промышленным манипуляционным роботам, промышленным транспортным роботам, сервисным роботам в целом, сервисным манипуляционным роботам и сервисным мобильным роботам.

Настоящий стандарт относится к тематической группе «Методы моделирования и программирования» и определяет метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность базовых элементов робототехнических комплексов (БЭ РТК) при проектировании.

Применение моделирования БЭ РТК на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца позволит избежать отказов РТК или их значительно сократить на этапе испытаний опытного образца, сокращая тем самым количество испытаний опытного образца, возможные итерации по доработке схем и конструкций, затраты на разработку РТК при одновременном повышении качества и надежности, в том числе в критических режимах работы, делая РТК конкурентоспособными на отечественном и международном рынке.

Использование только натурных испытаний РТК на внешние воздействующие факторы (ВВФ) без применения моделирования малоинформативно и неэффективно, так как на этапе проектирования не отслеживается большинство возможных отказов РТК; при испытаниях не проверяются критические режимы (либо технически невозможно, либо дорого из-за возможных отказов испытуемых изделий); из-за недоработок проектирования РТК, вскрытых путем испытаний, возможно множество итераций: доработка проекта — испытания опытного образца — доработка проекта и т. д., что значительно увеличивает сроки и стоимость разработки; при натурных испытаниях практически невозможно воспроизвести комплексные (одновременно действующие) воздействия; невозможно установить датчики во всех точках конструкции РТК и контролировать их поведение, выбор контрольных точек при испытаниях субъективен и опирается в основном на опыт и интуицию.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании

Robots and robotic devices.
Method of mathematical modeling of reliability indicators and virtualization of reliability tests of basic elements of robotic complexes in design

Дата введения — 2021—03—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт распространяется на роботов и робототехнические устройства.

1.2 Настоящий стандарт устанавливает метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность базовых элементов робототехнических комплексов (электронных блоков и узлов) на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца по результатам их моделирования на внешние воздействующие факторы с целью обеспечения требуемых показателей надежности.

1.3 Настоящий стандарт не распространяется на рассмотрение всех проблем проектирования и обеспечения надежности робототехнических комплексов.

2 Термины, определения и сокращения

2.1 В настоящем стандарте применен следующий термин с соответствующим определением:

2.1.1 **базовый элемент робототехнических комплексов:** Электронный блок или узел.

2.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения.

БЭ — базовые элементы;

ВВФ — внешние воздействующие факторы;

КРР — карты рабочих режимов;

ПУ — печатный узел;

РТК — робототехнические комплексы;

ТЗ — техническое задание;

ЭРИ — электрорадиоизделие.

3 Общие положения

3.1 Целью настоящего стандарта является оказание методической помощи предприятиям промышленности и организациям в применении математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК на ранних этапах проектирования до изготовления опытного образца.

В настоящем стандарте определен метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК при проектировании по результатам их моделирования на ВВФ с целью обеспечения требуемых показателей надежности [1], [2] и приведен пример его программной реализации.

Издание официальное

Установлен порядок применения данного метода на стадиях проектирования и изготовления, а также удостоверения заказчика в том, что на стадиях конструирования и производства выполнены оценки возможных вариантов конструктивного исполнения изделий с точки зрения достижения заданных ТЗ эксплуатационных характеристик.

3.2 Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК предназначен для использования подразделениями предприятий, на которые возложены соответствующие задачи.

3.3 Замена испытаний БЭ РТК компьютерным моделированием надежности еще до изготовления. Это значительная экономия денежных средств и сокращение сроков создания БЭ РТК при одновременном повышении качества и надежности за счет сокращения количества испытаний.

3.4 Настоящий стандарт устанавливает принципы применения математического моделирования БЭ РТК в процессе их проектирования с целью анализа и оптимизации принимаемых конструктивно-технологических решений, а также с целью своевременного выявления возможных несоответствий разрабатываемого образца БЭ РТК требованиям ТЗ. Включенные в настоящий стандарт принципы применения математического моделирования (и реализующие их системы автоматизированного проектирования) изложены применительно к решению задачи обеспечения надежности БЭ РТК.

3.5 Рекомендации и методы, приведенные в настоящем стандарте, предназначены для пользования специалистами — разработчиками БЭ РТК в процессе проектирования с целью выбора и предварительной оценки эффективности конструкторских решений в части обеспечения требований по надежности, а также с целью оптимизации программ испытаний опытных и серийных образцов БЭ РТК.

4 Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК, основанный на комплексной модели надежности БЭ РТК

4.1 Цель испытаний

Конечной целью испытаний является обеспечение требуемых показателей надежности БЭ РТК в условиях внешних дестабилизирующих воздействий на основе комплексной модели надежности БЭ РТК.

4.2 Общие положения

4.2.1 Комплексную модель надежности БЭ РТК создают на основе сквозного автоматизированного моделирования физических процессов. Таким образом, предварительно обязательно проводят моделирование всех физических процессов в БЭ РТК, так как на надежность БЭ РТК оказывают влияние внешние дестабилизирующие факторы — электрические, тепловые, механические, климатические, биологические, радиационные, электромагнитные, специальных сред и термические.

4.2.2 Показатели надежности БЭ РТК определяют исключительно по результатам их моделирования на внешние дестабилизирующие воздействия.

4.2.3 Для оценки показателей надежности БЭ РТК необходимо создание единой комплексной модели, в которой были бы учтены основные, влияющие на технические показатели БЭ РТК, связи между протекающими физическими процессами.

4.3 Комплексная модель надежности БЭ РТК на основе сквозного автоматизированного моделирования физических процессов

Под комплексностью понимается учет при анализе надежности всего комплекса ВВФ, включающих прежде всего тепловые, механические, электромагнитные воздействия. В состав программного обеспечения виртуальных испытаний на надежность должны входить модули по анализу электрических, тепловых, механических, электромагнитных процессов в БЭ РТК, созданию КРР ЭРИ и анализу показателей безотказности и долговечности. На рисунке 4.1 приведена структура комплексной модели надежности, основанной на виртуальных испытаниях БЭ РТК на внешние тепловые, механические, электромагнитные воздействия.

В состав комплексной модели надежности входит интегрированная база данных ЭРИ и материалов по геометрическим, физико-механическим, усталостным, теплофизическим, электрическим, электромагнитным и надежностным параметрам.

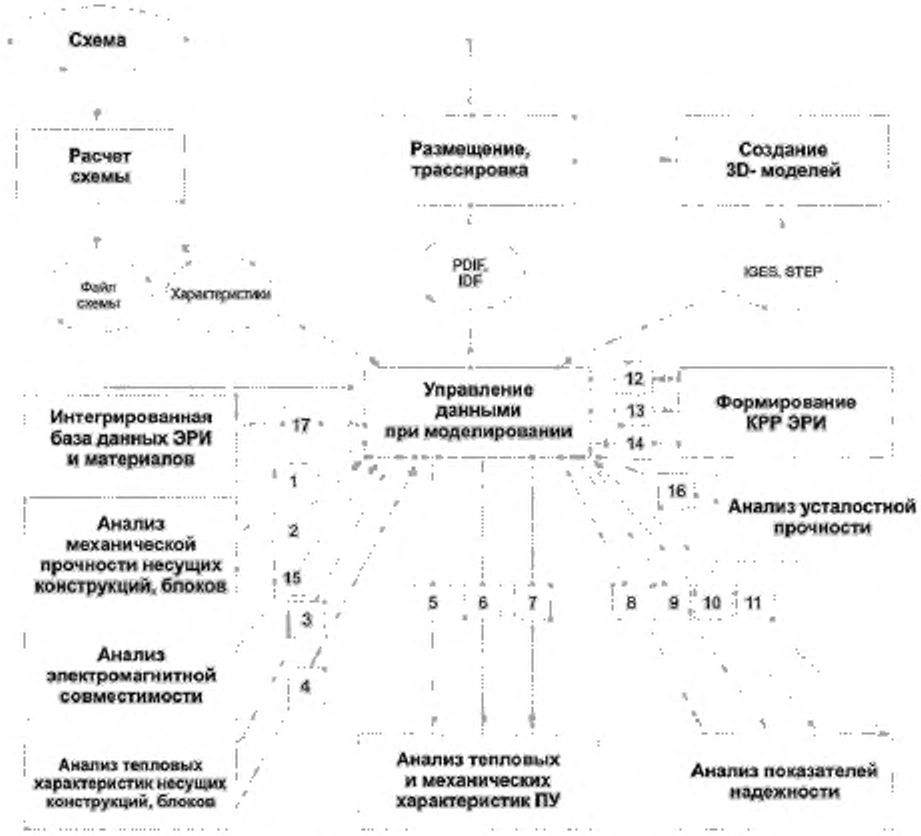

Рисунок 4.1 — Структура комплексной модели надежности БЭ РТК на основе сквозного автоматизированного моделирования физических процессов

4.4 Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

4.4.1 На первом этапе оцениваемыми характеристиками являются электрические, тепловые, механические, электромагнитные характеристики БЭ РТК, которые не должны превышать максимально допустимые значения, заданные в нормативных документах и технической документации.

4.4.2 На втором этапе оцениваемыми характеристиками являются показатели безотказности и долговечности, полученные с учетом рассчитанных на первом этапе итоговых электрических, тепловых, механических, электромагнитных характеристик БЭ РТК.

4.4.3 Оценка электрических характеристик на первом этапе

4.4.3.1 Оцениваемыми электрическими характеристиками являются электрические характеристики, необходимые для теплового расчета, расчета показателей надежности и формирования КРР ЭРИ.

4.4.3.2 Интеграция модуля ввода электрической схемы системы и подсистемы анализа конструкций ПУ БЭ РТК на тепловые и механические воздействия.

Необходимо передать в подсистему анализа конструкций ПУ БЭ РТК на тепловые и механические воздействия файл с перечнем ЭРИ, имеющий расширение ilp и следующую структуру.

<Позиционное обозначение ЭРИ>:<Полная условная запись ЭРИ>

4.4.3.3 Интеграция модуля расчета электрической схемы и подсистемы анализа конструкций ПУ БЭ РТК на тепловые и механические воздействия:

- результаты расчета мощностей тепловыделения ЭРИ, в т. ч. для цифровых и аналоговых микросхем, в статическом и динамическом режимах, сохраняют в текстовом файле следующей структуры:

<Позиционное обозначение ЭРИ><Значение мощности в Вт>

- данный текстовый файл передают в подсистему анализа конструкций ПУ БЭ РТК на тепловые и механические воздействия;

- на основе полученных мощностей в подсистеме анализа конструкций ПУ БЭ РТК на тепловые и механические воздействия рассчитывают температуры в конструкции ПУ, в том числе на каждом ЭРИ.

4.4.3.4 Интеграция модуля расчета электрической схемы системы и подсистемы анализа показателей безотказности и долговечности с учетом реальных режимов работы ЭРИ:

- электрические характеристики (токи, напряжения, мощности и др.), полученные в результате расчета электрической схемы, сохраняют в текстовом файле следующей структуры:

<Позиционное обозначение ЭРИ><Сила тока в А><Напряжение в В><Мощность в Вт><др. возможные электрические характеристики>

- данный текстовый файл передают в подсистему анализа показателей безотказности и долговечности;

- на основе полученных электрических характеристик в подсистеме анализа показателей безотказности и долговечности рассчитывают показатели безотказности и долговечности БЭ РТК, в том числе каждого ЭРИ.

4.4.3.5 Интеграция модуля расчета электрической схемы и подсистемы автоматизированного заполнения КРР ЭРИ:

- электрические характеристики (токи, напряжения, мощности и др.), полученные в результате расчета электрической схемы, сохраняют в текстовом файле log.txt следующей структуры:

<Позиционное обозначение ЭРИ><Сила тока в А><Напряжение в В><Мощность в Вт><др. возможные электрические характеристики>

В приложении А приведены перечни параметров ЭРИ (в соответствии с [1]).

Данный текстовый файл передают в подсистему автоматизированного заполнения КРР ЭРИ.

На основе полученных электрических характеристик в подсистеме автоматизированного заполнения КРР ЭРИ формируются КРР ЭРИ.

4.4.3.6 В результате получается система сквозного проектирования.

Расчет электрической схемы → Расчет температур ЭРИ → Формирование КРР ЭРИ → Анализ показателей безотказности и долговечности ЭРИ.

В приложении Б приведен пример комплексного анализа надежности.

4.4.4 Оценка тепловых характеристик на первом этапе

4.4.4.1 Оцениваемыми тепловыми характеристиками являются постоянные температуры в узлах модели при стационарном тепловом воздействии и температуры в узлах модели в зависимости от времени при нестационарном тепловом воздействии.

4.4.4.2 Дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа при решении стационарной задачи в декартовой системе координат в применении к твердым изотропным телам имеет вид:

$$\lambda \nabla^2 T + q_v = 0, \tag{4.1}$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала изотропного твердого тела;

∇ — оператор Лапласа;

T — температура;

g_v — удельная мощность внутренних источников энергии.

Описывающее теплообмен в элементарном объеме $V_0 = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ конечно-разностное уравнение приведено к следующему виду:

$$[\sigma_x \cdot (T_1 - T_0) - \sigma_x(T_0 - T_2)] + [\sigma_y \cdot (T_3 - T_0) - \sigma_y(T_0 - T_4)] + [\sigma_z \cdot (T_5 - T_0) - \sigma_z \cdot (T_0 - T_6)] + Q_0 = 0, \tag{4.2}$$

где T_i — температура соседних элементарных объемов в виде параллелепипедов, на которые условно разбивается твердое тело; σ_x, σ_y, σ_z имеют физический смысл и размерность (Вт/К) тепловых проводимостей между соседними элементарными объемами твердого тела по осям OX, OY и OZ соответственно:

$$\sigma_x = \frac{\lambda \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta x}, \ \sigma_y = \frac{\lambda \cdot \Delta x \cdot \Delta z}{\Delta y}, \ \sigma_z = \frac{\lambda \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\Delta z}, \tag{4.3}$$

Δx, Δy, Δz — размеры параллелепипедов;

$Q_0 = q_0 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ — выделяемая в элементарном объеме V_0 тепловая мощность;

q — удельная мощность внутренних источников энергии в элементарном объеме V_0.

Конечно-разностное уравнение (4.2), описывающее теплообмен в элементарном объеме твердого тела, имеет аналогичное уравнение, которое записано на основе 1-го закона Кирхгофа для суммы токов 0-го узла электрической цепи. Пример такой цепи представлен на рисунке 4.2.

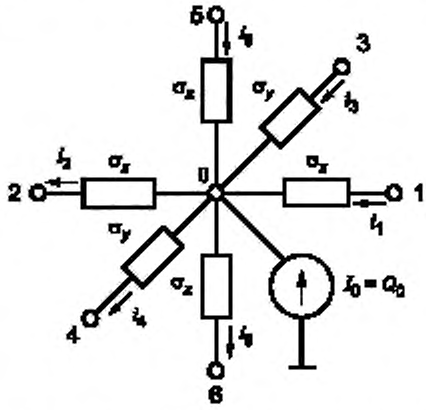

Рисунок 4.2 — Фрагмент электрической схемы, моделирующей процессы теплопередачи в элементарном объеме V_0

4.4.4.3 При решении нестационарных задач в электрическую эквивалентную цепь вводят конденсаторы, моделирующие теплоемкости соответствующих условно изотермичных объемов конструкции изделий. Наличие конденсаторов в схеме возможно пояснить уравнением (4.1), в которое вводится соответствующая компонента, т. е.

$$\lambda \nabla^2 T + q_V - C_p \rho \frac{dT}{d\tau} - 0, \qquad (4.4)$$

где C_p — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · К); ρ — плотность материала, кг/м^3; τ — время, с.

Описывающее теплообмен в элементарном объеме $V_0 = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ конечно-разностное уравнение приведено к следующему виду:

$$[\sigma_x \cdot (T_1 - T_0) - \sigma_x (T_0 - T_2)] + [\sigma_y \ (T_3 - T_0) - \sigma_y (T_0 - T_4)] + [\sigma_z \ (T_5 - T_0) - \sigma_z \cdot (T_0 - T_6)] + C_0 \frac{dT_0}{d\tau} + Q_0 = 0, \qquad (4.5)$$

где C_0 — теплоемкость объема V_0.

Аналогом уравнения (4.4) будет электрическая цепь, представленная на рисунке 4.3, в которой теплоемкость выделенного объема моделируется с помощью электрической емкости.

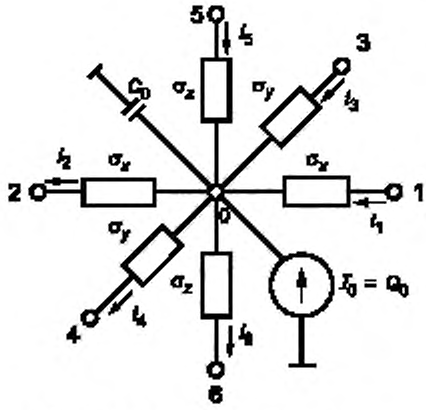

Рисунок 4.3 — Фрагмент электрической схемы, моделирующей нестационарные процессы теплопередачи через элементарный объем V_0

При анализе нестационарных тепловых режимов в изделии кроме граничных условий необходимо задать начальные (временные) условия, которые определяют температурное поле в начальный момент времени и заключаются в том, что для начального момента времени τ_0 должна быть известна функция $T = f(x, y, z, \tau)$.

Эта функция задается в некотором интервале времени $\Delta\tau$, в течение которого изучаются тепловые процессы в конструкции изделия.

4.4.5 Оценка механических характеристик на первом этапе

4.4.5.1 Оцениваемыми механическими характеристиками являются:

- резонансные частоты конструкции БЭ РТК;
- перемещения и ускорения по всем осям и суммарные в конструкции БЭ РТК при всех видах механических воздействий;
- механические напряжения в конструкции БЭ РТК при всех видах механических воздействий;
- время до усталостного разрушения при вибрационных и ударных воздействиях.

4.4.5.2 Для определения механических характеристик БЭ РТК без виброизоляторов следует проводить конечно-элементный анализ. Система уравнений движения конструкции изделия выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{r}\} + [C]\{\dot{r}\} + [K]\{r\} = \{F\}, \tag{4.6}$$

где $\{r\}$ — вектор узловых перемещений;

$[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, вязкого демпфирования и жесткости соответственно;

$\{F\}$ — вектор внешних воздействий.

4.4.5.3 Для определения механических характеристик БЭ РТК, установленных на виброизоляторах, следует использовать систему дифференциальных уравнений движения на основе уравнения Лагранжа. Для системы с шестью степенями свободы они записываются в следующем виде.

$$d(\partial T/\partial \dot{q}_i)/dt - \partial T/\partial q_i + \partial \Pi/\partial q_i = Q_i(t), \quad i = 1, 2, \ldots, 6, \tag{4.7}$$

где q_i — i-я обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ — i-я обобщенная скорость;

T — кинетическая энергия системы;

П — потенциальная энергия системы;

$Q_i(t)$ — обобщенная сила, действующая по направлению i-й обобщенной координаты.

4.4.6 Оценка электромагнитных характеристик на первом этапе

4.4.6.1 Оцениваемыми характеристиками являются напряженности электрического и магнитного полей внутри и снаружи корпусов БЭ РТК, а также эффективность экранирования электрического и магнитного полей в диапазоне частот.

4.4.6.2 Экранирование служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы, блоки, приборы, кабели, помещения и здания, а также для того, чтобы подавить исходящие из электрических и электронных промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями. Экран устанавливают между источником и приемником помех, тем самым снижая напряженности электрического E_0 и магнитного H_0 воздействующего поля до значений E_1, H_1 за экраном. Физически экранирование объясняется наведением на поверхности экрана заряда или индуктированием в нем токов, поле которых накладывается на воздействующее, ослабляя его. Тем самым удаляется чувствительный приемник помехи от источника.

На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала экрана, конфигурация и размеры экрана.

Экранирование осуществляется частично поглощением энергии поля материалом экрана (коэффициент затухания a_{SA}, обусловленный поглощением), а частично — отражением падающей волны (коэффициент затухания a_{SR}, обусловленный отражением).

Результирующую эффективность экранирования, дБ, возможно определить как

$$a_S = 20\lg\left(\frac{E_0}{E_1}\right) \tag{4.8}$$

или

$$a_S = 20\lg\left(\frac{H_0}{H_1}\right), \quad (4.9)$$

т. е. a_s состоит из двух компонентов:

$$a_S = a_{SA} + a_{AR}. \quad (4.10)$$

При этом не учитывают многократные отражения от стенок экрана.

4.4.7 Оценка показателей безотказности и долговечности на втором этапе

Показателями безотказности БЭ РТК являются:

- вероятность безотказной работы R;
- интенсивность отказов λ;
- среднее время безотказной работы T_1.

В качестве показателя долговечности рассматривают ресурс БЭ РТК.

Надежность БЭ РТК определяется надежностью составляющих их компонентов. Это могут быть блоки, ПУ и ЭРИ.

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа приобретает вид:

$$R(t) = \exp(-\lambda \cdot t), \quad (4.11)$$

а среднее время безотказной работы:

$$T_1 = 1/\lambda. \quad (4.12)$$

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитывают по математическим моделям, имеющим вид:

$$\Lambda_Э = \lambda_б \cdot \prod_{i=1}^{n} K_i \quad \text{или} \quad \lambda_Э = \lambda_{б.с.г} \cdot \prod_{i=1}^{n} K_i \quad , \quad (4.13)$$

где $\lambda_б(\lambda_{б.с.г})$ — исходная (базовая) интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс;

K_i — коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов (режимов и условий эксплуатации, а также конструктивных, функциональных и технологических особенностей ЭРИ);

n — число учитываемых факторов.

Для отдельных групп сложных изделий, суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов составных частей ЭРИ (например, вращающихся частей и обмоток электродвигателя), математическая модель расчета интенсивности отказов имеет вид:

$$\Lambda_Э = \sum_{j=1}^{m} \lambda_{бj} \cdot \prod_{i=1}^{n_j} K_{ij}, \quad (4.14)$$

где $\lambda_{бj}$ — исходная (базовая) интенсивность отказов j-го потока отказов;

m — количество независимых потоков отказов составных частей ЭРИ;

K_{ij} — коэффициент, учитывающий влияние i-го фактора в j-м потоке отказов;

n_j — количество факторов, учитываемых в j-м потоке отказов.

Количество и математические модели коэффициентов K_i характерны для конкретных классов ЭРИ. Так, например, для резисторов коэффициент режима рассчитывают по модели:

$$K_р = A \cdot e^{B\left(\frac{t_1+273}{N_t}\right)^G} \cdot e^{\left[\frac{P}{P_н\left(\frac{t+273}{273}\right)^J}\right]^H}, \quad (4.15)$$

где A, B, N_t, G, N_s, J, H — постоянные коэффициенты модели;

t — температура окружающей среды, °С;

P — рабочая мощность рассеяния резисторов, Вт;

$P_н$ — номинальная мощность рассеяния резисторов, Вт.

Или, например, коэффициент $K_{ИИ}$, учитывающий воздействие радиационного излучения, для интегральных микросхем определяется исходя из дозы ионизирующего излучения:

- при дозе 0—10 крад $K_{ИИ} = 1$;

- при дозе 20 крад $K_{ИИ}$ = 1,035;
- при дозе 40 крад $K_{ИИ}$ = 1,1.

При расчете надежности БЭ РТК, которые в эксплуатации основную часть времени находятся в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии с периодическим контролем работоспособности, следует использовать значения интенсивности отказов $\lambda_{Э.Х}$ групп ЭРИ, рассчитываемые по моделям:

- для неподвижных объектов:

$$\Lambda_{Э.Х} = \lambda_б \cdot K_Х \cdot K_{t.x} \cdot K_{усл} \cdot K_{пр} \text{ или } \lambda_{Э.Х} = \lambda_{Х.С.Г} \cdot K_Х \cdot K_{t.x} \cdot K_{усл} \cdot K_{пр}, \quad (4.16)$$

- для подвижных объектов:

$$\lambda_{Э.Х} = \lambda_б \ K_Х \cdot K_{t.x} \cdot K_Э \cdot K_{пр} \text{ или } \lambda_{Э.Х} = \lambda_{Х.С.Г} \cdot K_Х \cdot K_{t.x} \cdot K_Э \cdot K_{пр}, \quad (4.17)$$

где $\lambda_{Х.С.Г}$ — интенсивность отказов ЭРИ по результатам испытаний изделий на сохраняемость в упаковках заводов-изготовителей;

$\lambda_б$ — базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ;

$K_{t.x}$ — коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов $\lambda_{Х.С.Г}$ в зависимости от температуры окружающей среды;

$K_{пр}$ — коэффициент приемки;

$K_Э$ — коэффициент эксплуатации;

$K_{усл}$ — коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов $\lambda_{Х.С.Г}$ в зависимости от условий эксплуатации в режиме ожидания (хранения).

Показатели безотказности БЭ РТК рассчитывают исходя из показателей безотказностей составляющих ее элементов. Вероятность безотказной работы нерезервированной системы $R_C(t)$ в течение времени t, имеющей последовательное соединение n элементов в смысле надежности (система остается работоспособной, если все элементы исправны) с независимыми и случайными отказами этих элементов равна:

$$R_C(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t), \quad (4.18)$$

где $R_i(t)$ — вероятность безотказной работы i-го элемента.

$$R_C(t) = \prod_{i=1}^{n} \exp(-\lambda_i \ t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot t\right) = \exp(-\lambda_C \cdot t), \quad (4.19)$$

где $\lambda_C = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ — интенсивность отказов системы.

При вычислении показателей безотказности резервированных систем имеют место режимы нагрузки резервных элементов при эксплуатации.

Показатели безотказности системы при пассивном резервировании с неизменной нагрузкой и при активном нагруженном резервировании оцениваются одними и теми же математическими выражениями. Так как переключатель, включающий резерв, обладает мгновенным быстродействием и абсолютной надежностью, вероятность безотказной работы определяется как:

$$R_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} \left(1 - R_i(t)\right) = 1 - \prod_{i=1}^{m} \left(1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)\right), \quad (4.20)$$

где $R_i(t)$ — вероятность безотказной работы i-го устройства;

m — число соединенных параллельно устройств (основное + резервные),

λ_i — интенсивность отказов i-го устройства.

Вероятность безотказной работы системы при активном облегченном резервировании (при идеальном переключателе резерва) определяется из выражения:

$$R_C(t) = \exp(-\lambda_0 \cdot t) + \exp(-\lambda_0 \cdot t) \sum_{j=1}^{m-1} \frac{\left(1 - \left(-\lambda_j \cdot t\right)\right)^j}{j!} \cdot \prod_{i=1}^{j} \left(i - 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_i}\right) \quad (\forall i \in [1, m-1])(\lambda_0 > \lambda_i), \quad (4.21)$$

где λ_0 и λ_i — соответственно интенсивности отказов работающего основного устройства и i-го устройства, находящегося в облегченном резерве.

Вероятность безотказной работы системы при активном ненагруженном резервировании (при идеальном переключателе резерва) вычисляют по формуле:

$$R_C(t) = \exp(-\lambda_0 \cdot t) \cdot \sum_{j=0}^{m-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}. \quad (4.22)$$

Вероятность безотказной работы при скользящем резервировании (если система состоит из n основных и одного резервного элемента, находящегося в ненагруженном состоянии) определяется как:

$$R_C(t) = \left\{1 + n\frac{\lambda_0}{\lambda_n}\left[1 - \exp(-\lambda_n \cdot t)\right]\right\} \cdot \exp(-n \cdot \lambda_0 \cdot t), \quad (4.23)$$

где λ_0 и λ_n — соответственно интенсивности отказов работающего элемента и переключателя резерва.

Показателями долговечности являются:

- полный срок службы, год;
- полный ресурс, ч;
- остаточный ресурс, ч.

Полный срок службы $C_П$ вычисляют по формуле

$$C_П = \min C_j/(365 \cdot 24), \quad (4.24)$$

где C_j — срок службы ЭРИ, ч.

Величину C_j вычисляют по формуле

$$C_j = \frac{1}{\lambda_j}, \quad (4.25)$$

где λ_j — эксплуатационная интенсивность отказов j-го ЭРИ, 1/ч.

Полный ресурс $T_{РП}$, ч, вычисляют по формуле

$$T_{РП} = kC_П \cdot 365 \cdot 24, \quad (4.26)$$

где k — коэффициент среднегодовой нагрузки, принятый в приборостроении (задается пользователем; находится в пределах до 8000).

Должна быть использована методика определения остаточного ресурса БЭ РТК, которая позволяет учесть колебания электрических характеристик схем и температур окружающей среды и ЭРИ.

Исходными данными для расчета ресурса являются: структура БЭ РТК [число узлов (блоков и т. п.) БЭ РТК, число элементов в узлах (блоках и т. п.)] n_j, интенсивности отказов элементов λ_j. В этом случае ресурс каждого ЭРИ в момент времени τ вычисляют по формуле

$$t_j(\tau) = 1/\lambda_j(\tau), \quad (4.27)$$

где $\lambda_j(\tau)$ — интенсивность отказов j-го ЭРИ в момент времени τ, которая равна:

$$\lambda_j(\tau) = \lambda_{бj} \prod_{k=1}^{m} K_k(\tau), \quad (4.28)$$

где $\lambda_{бj}$ — интенсивность отказов ЭРИ при лабораторных условиях работы;

$K_k(\tau)$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние k-го фактора в момент τ;

m — число учитываемых факторов.

Остаточный ресурс БЭ РТК после наработки t вычисляют по формуле

$$\pi_C(t) = \int_0^t \frac{1}{\lambda_C(\tau)} d\tau - t, \quad (4.29)$$

где $\lambda_C(\tau) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_j(\tau)$ — интенсивность отказов БЭ РТК.

Средняя вероятность безотказной работы — это интегральное среднее значение вероятностей безотказной работы при конкретной температуре ЭРИ, вычисляемое по формуле

$$P_{СР}(t) = \int_0^t P(\tau)d\tau. \quad (4.30)$$

Среднюю наработку до отказа (ресурс) вычисляют по следующей формуле:

$$T_{рес}(t) = \int_0^t T(\tau)d\tau. \quad (4.31)$$

Показатели безопасности (отсутствия недопустимого риска):

- назначенный ресурс;
- назначенный срок службы.

Назначенный ресур $T_{РН}$ вычисляют по формуле

$$T_{РН} = \frac{T_{РП}}{m}, \quad (4.32)$$

где m — коэффициент запаса по ресурсу (задается пользователем; находится в пределах 1—4);

$T_{РП}$ — полный ресурс, ч.

Назначенный срок службы $C_Н$ вычисляют по формуле

$$C_Н = \frac{C_П}{n}, \quad (4.33)$$

где n — коэффициент запаса по сроку службы (задается пользователем; находится в пределах 1—4);

$C_п$ — полный срок службы.

4.4.8 Оценка интенсивности отказов из-за механических воздействий

Анализ на случайную вибрацию позволяет получить на выходе среднеквадратические отклонения («1σ») компонент тензора напряжений во всех узлах конечно-элементной сетки. Все компоненты тензора распределены по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю. Однако для определения отказа (по критерию превышения предела прочности) требуется знать эквивалентные одноосевые напряжения, адекватно характеризующие напряженное состояние в отдельных узлах модели. Для расчета эквивалентных напряжений используют критерий Губера-Мизеса.

Анализ на случайную вибрацию имеет дело со случайными величинами, имеющими некоторое распределение и соответствующие вероятностные характеристики. Зная эквивалентные напряжения, т. е. зная закон их распределения, возможно оценить вероятность безотказной работы за один цикл случайной вибрации. Соответственно, для получения вероятности безотказной работы за произвольное количество циклов возможно применить обычные правила суммирования вероятностей.

Задающее воздействие при случайной вибрации характеризуется спектральной плотностью ускорения в местах крепления модели. Сам график спектральной плотности может иметь произвольную форму, т. е. в общем случае воздействие является широкополосным случайным процессом.

Напряженное состояние в отдельных «опасных» узлах (т. е. в узлах, где напряжения максимальны и отказ наиболее вероятен) характеризуется *узкополосным* случайным процессом, так как колебание в отдельных узлах определяется собственными частотами и формами, характерными для моделируемой конструкции. Для каждого «опасного» узла существует только одна доминантная частота колебаний, которая представляется в виде отдельно стоящего «горба» на графике спектральной плотности. Для узкополосного случайного процесса плотность распределения локальных экстремумов равна плотности распределения амплитуд в истории нагружения. Зная доминантную частоту колебаний, возможно вычислить зависимость вероятности безотказной работы от времени. Подход к вычислению зависимости вероятности безотказной работы от времени следующий:

1 Поскольку для отказа всей конструкции достаточно, чтобы отказ (т. е. превышение предела прочности) наступил хотя бы в одном узле конечно-элементной сетки, то целесообразнее выделить в модели несколько «опасных» узлов для каждой детали, в которых потенциально может наступить отказ.

2 Для всех таких «опасных» узлов вычислить эквивалентное напряжение, точнее, его среднеквадратическое отклонение. Необходимо при этом, чтобы эквивалентное напряжение, определяемое согласно некоторому критерию, имело нормальный закон распределения с математическим ожидани-

ем, равным нулю. В случае узкополосного случайного процесса эквивалентное напряжение, имеющее нормальный закон распределения, будет иметь распределение локальных амплитуд (экстремумов), характеризующееся распределением Рэлея.

Доминантную (среднестатистическую) частоту колебаний эквивалентного напряжения для узкополосного случайного процесса рассчитывают по формуле

$$f_d = \frac{\sigma_{vel}}{2\pi \cdot \sigma_{disp}}, \tag{4.34}$$

где σ_{disp} — среднеквадратическое отклонение эквивалентного напряжения в узле; σ_{vel} — среднеквадратическое отклонение скорости изменения эквивалентного напряжения в узле.

Если для эквивалентного напряжения известна спектральная плотность, то доминантную частоту рассчитывают по формуле

$$f_d = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \tag{4.35}$$

где m_0 и m_2 — соответственно нулевой и второй моменты спектральной плотности эквивалентного напряжения.

Вероятность безотказной работы за один цикл эквивалентного напряжения в узле равна:

$$p(1) = 1 - \exp\left[-\frac{\sigma_{disp}^2}{2\sigma_{disp}^2}\right], \tag{4.36}$$

где σ_{disp} — допустимое напряжение в узле, соответствующее пределу прочности материала.

Предполагая, что отказ может наступить в каждом цикле с одинаковой вероятностью $p(1)$, вероятность безотказной работы за N циклов равна:

$$p(N) = p(1)^N. \tag{4.37}$$

Если вероятность безотказной работы зависит от времени в часах, данную формулу следует переписать в виде:

$$p(t) = p(1)^{t \cdot fd \cdot 3600}. \tag{4.38}$$

Наработку на отказ вычисляют по формуле

$$T_0 = \int_0^{\infty} p(t)dt = -\frac{1}{3600\ f_d\ \ln(p(1))}. \tag{4.39}$$

Средняя интенсивность отказов равна:

$$\lambda = \frac{1}{T_0}. \tag{4.40}$$

4.5 Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

4.5.1 Условия проведения испытаний

4.5.1.1 Наличие российского программного обеспечения, предназначенного для моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность БЭ РТК, внедренного на ведущих предприятиях Российской Федерации (наличие договоров на внедрение и опыта использования не менее 10 лет).

4.5.1.2 Наличие базы данных, содержащей модели надежности и параметры моделей надежности для отечественной электронной компонентной базы.

4.5.2 Режимы испытаний

4.5.2.1 Нагруженная эксплуатация.

4.5.2.2 Режим ожидания (хранения), неподвижный объект.

4.5.2.3 Режим ожидания (хранения), подвижный объект.

4.5.3 Порядок проведения испытаний

4.5.3.1 Задают группу аппаратуры.

4.5.3.2 Задают время безотказной работы, для которого рассчитывают вероятность безотказной работы.

4.5.3.3 Выбирают режим эксплуатации: нагруженная эксплуатация, режим ожидания (хранения) неподвижный объект, режим ожидания (хранения) подвижный объект.

4.5.3.4 Задают условия эксплуатации в режиме ожидания (хранения). в отапливаемом помещении, в неотапливаемом помещении, под навесом.

4.5.3.5 По результатам испытаний составляют отчет, в котором указывают следующую информацию:

- основные показатели безотказности: средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, эксплуатационная интенсивность отказов;
- дополнительные показатели безотказности: средняя вероятность безотказной работы; вероятность отказа = 1 — вероятность безотказной работы; среднее время безотказной работы;
- показатели долговечности: полный срок службы, остаточный ресурс (учитывает колебания электрических характеристик схем и температур окружающей среды и ЭРИ), полный ресурс;
- показатели безопасности: назначенный ресурс, назначенный срок службы.

Эти показатели рассчитывают как для БЭ РТК в целом, так и для каждого отдельного ЭРИ.

4.5.4 Место проведения виртуальных испытаний

Испытания согласно данному методу следует проводить в организации, обладающей надлежащей вычислительной техникой с установленным программным обеспечением, реализующим данный метод виртуальных испытаний.

4.6 Отчетность

Протокол испытаний должен содержать следующую информацию:

1 Описание конструкции БЭ РТК.

2 Исходные данные для моделирования физических процессов и анализа показателей надежности.

3 Результаты моделирования физических процессов и анализа показателей надежности.

4 Выводы о соответствии выходных характеристик физических процессов и показателей надежности требованиям ТЗ.

Приложение А
(справочное)

Перечни параметров электрорадиоизделий для некоторых форм карт рабочих режимов

ФОРМА 55		
Диоды (выпрямительные, импульсные, универсальные), варикапы и диодные сборки		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Выпрямительный режим, постоянный или средний выпрямленный ток, мА	
2	Выпрямительный режим, максимальный импульс тока при включении, А	
3	Выпрямительный режим, длительность режима перегрузки, мс	
4	Импульсный режим, максимальный импульсный прямой ток, А	
5	Импульсный режим, длительность импульса, мкс	
6	Максимальное обратное напряжение, В	
7	Частота выпрямленного тока (частота следования импульсов), Гц	
8	Рассеиваемая мощность, мВт	
9	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 58		
Транзисторы и транзисторные сборки		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Статический режим, коллектор-эмиттер, напряжение, В	
2	Статический режим, коллектор-база, напряжение, В	
3	Статический режим, эмиттер-база, напряжение, В	
4	Статический режим, коллектора ток, А	
5	Статический режим, базы ток, А	
6	Динамический режим, коллектор-эмиттер, напряжение, В	
7	Динамический режим, коллектор-база, напряжение, В	
8	Динамический режим, эмиттер-база, напряжение, В	
9	Динамический режим, коллектора ток, А	
10	Динамический режим, базы ток, А	
11	Длительность импульса, мкс	
12	Частота следования, Гц	
13	Сопротивление в цепи базы, Ом	
14	Режим при включении и выключении, напряжение коллектор-эмиттер, В	
15	Режим при включении и выключении, максимальный ток коллектора, А	
16	Режим при включении и выключении, длительность фронта (спада), мкс	
17	Средняя мощность, Вт	
18	Импульсная мощность, Вт	
19	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 60		
Полевые транзисторы и транзисторные сборки		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Статический режим, затвор (затвор-1) — исток, напряжение, В	
2	Статический режим, сток-затвор, напряжение, В	
3	Статический режим, затвор-исток (прямое смещение), напряжение, В	

4	Статический режим, сток-исток, напряжение, В	
5	Статический режим, подложка (затвор-2) — исток, напряжение, В	
6	Статический режим, ток стока, А	
7	Статический режим, ток затвора, А	
8	Динамический режим, затвор (затвор-1) — исток, напряжение, В	
9	Динамический режим, сток-затвор, напряжение, В	
10	Динамический режим, затвор-исток (прямое смещение), напряжение, В	
11	Динамический режим, сток-исток, напряжение, В	
12	Динамический режим, подложка (затвор-2) — исток, напряжение, В	
13	Динамический режим, ток стока, А	
14	Динамический режим, ток затвора, А	
15	Длительность импульса, мкс	
16	Частота следования, Гц	
17	Средняя мощность, Вт	
18	Импульсная мощность, Вт	
19	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 63		
Операционные усилители и компараторы напряжения		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, допустимое отклонение напряжения питания, %	
4	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания	
5	Входные цепи, номера выводов	
6	Входные цепи, входное напряжение, В	
7	Входные цепи, входное синфазное напряжение, В	
8	Выходные цепи, номера выводов	
9	Выходные цепи, сопротивление нагрузки, Ом	
10	Выходные цепи, емкость нагрузки, пФ	
11	Выходные цепи, выходной ток, мА	
12	Мощность рассеивания, мВт	

ФОРМА 64		
Стабилизаторы напряжения, схемы управления импульсными стабилизаторами напряжения		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, допустимое отклонение напряжения питания, %	
4	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания	
5	Входные цепи, номера выводов	
6	Входные цепи, входное напряжение, В	
7	Входные цепи, напряжение коммутации, В	
8	Выходные цепи, номера выводов	

9	Выходные цепи, сопротивление нагрузки, Ом	
10	Выходные цепи, выходной ток, мА	
11	Падение напряжения на стабилизаторе, В	
12	Частота коммутации, Гц	
13	Коммутируемая мощность, мВт	
14	Мощность рассеивания, мВт	

ФОРМА 64а		
Коммутаторы и ключи		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, допустимое отклонение напряжения питания, %	
4	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания	
5	Входные цепи, номера выводов	
6	Входные цепи, напряжение коммутации, В	
7	Входные цепи, входное напряжение низкого уровня, В	
8	Входные цепи, входное напряжение высокого уровня, В	
9	Входные цепи, низкий уровень управляющего напряжения, В	
10	Входные цепи, высокий уровень управляющего напряжения, В	
11	Входные цепи, входное напряжение, В	
12	Входные цепи, входной ток, А	
13	Выходные цепи, номера выводов	
14	Выходные цепи, выходной ток, А	
15	Выходные цепи, выходной импульсный ток, А	
16	Выходные цепи, коммутируемый ток, А	
17	Выходные цепи, напряжение сток-исток, В	
18	Выходные цепи, ток стока, А	
19	Частота переключения, Гц	
20	Мощность рассеивания, мВт	

ФОРМА 64б		
Усилители		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, допустимое отклонение напряжения питания, %	
4	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания	
5	Входные цепи, номера выводов	
6	Входные цепи, входное напряжение, В	
7	Входные цепи, частота входного сигнала, Гц	
8	Выходные цепи, номера выводов	
9	Выходные цепи, выходной ток, А	
10	Выходные цепи, сопротивление нагрузки, Ом	

11	Рабочая частота, Гц	
12	Граничная частота, Гц	
13	Полоса пропускания, Гц	
14	Мощность рассеивания, мВт	

ФОРМА 64в		
Балансные смесители		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, допустимое отклонение напряжение питания, %	
4	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания	
5	Входные цепи, номера выводов	
6	Входные цепи, входное напряжение, В	
7	Входные цепи, входное напряжение по входу X, В	
8	Входные цепи, входное напряжение по входу Y, В	
9	Выходные цепи, номера выводов	
10	Выходные цепи, сопротивление нагрузки, Ом	
11	Выходные цепи, частота выходного сигнала, Гц	

ФОРМА 65		
Цифровые функциональные узлы (модули, микромодули, микросхемы)		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Цепи питания, номера выводов	
2	Цепи питания, напряжение питания, В	
3	Цепи питания, порядок подачи напряжения питания и входных сигналов	
4	Входные цепи, номера выводов	
5	Входные цепи, напряжение низкого уровня, В	
6	Входные цепи, напряжение высокого уровня, В	
7	Входные цепи, длительность импульса, нс	
8	Входные цепи, время перехода при включении, нс	
9	Входные цепи, время перехода при выключении, нс	
10	Входные цепи, частота, МГц	
11	Входные цепи, время t_1, нс	
12	Входные цепи, время t_2, нс	
13	Выходные цепи, номера выводов	
14	Выходные цепи, выходной ток низкого уровня, мА	
15	Выходные цепи, выходной ток высокого уровня, мА	
16	Выходные цепи, емкость нагрузки, пФ	
17	Мощность рассеивания, мВт	
18	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 67		
Конденсаторы, конденсаторные сборки, помехоподавляющие фильтры и ионисторы		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Напряжение постоянное, В	
2	Напряжение переменное (амплитудное), В	
3	Напряжение импульсное, В	
4	Напряжение суммарное, В	
5	Максимальный ток переменный, А	
6	Максимальный ток проходной, А	
7	Максимальный ток разрядный, А	
8	Длительность зарядки, с (не менее)	
9	Реактивная мощность, Вар	
10	Частота максимальная, Гц	
11	Длительность импульса, мкс	
12	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 68		
Резисторы, резисторные сборки, терморезисторы, поглотители и потенциометры		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Напряжение постоянное, В	
2	Напряжение переменное (амплитудное), В	
3	Напряжение импульсное, В	
4	Напряжение суммарное, В	
5	Импульсный режим, частота, Гц	
6	Импульсный режим, длительность импульса, мкс	
7	Импульсный режим, импульсная мощность, Вт	
8	Импульсный режим, средняя мощность, Вт	
9	Импульсный режим, коэффициент нагрузки	
10	Ток через подвижный контакт переменного резистора, мА	
11	Температура окружающей среды, °С	
12	Температура перегрева, °С	
13	Суммарная мощность, Вт	
14	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 77		
Электромагнитные реле, контакторы, вакуумные выключатели и переключатели, магнитоуправляемые контакты		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Рабочее напряжение, В	
2	Рабочий ток, А	
3	Коммутируемое напряжение минимальное, В	
4	Коммутируемое напряжение максимальное, В	
5	Коммутируемый ток минимальный, А	
6	Коммутируемый ток максимальный, А	
7	Пропускаемый ток минимальный, А	

8	Пропускаемый ток максимальный, А	
9	Максимальная коммутируемая (пропускаемая) мощность	
10	Род тока (постоянный, переменный)	
11	Длительность протекания тока перегрузки, с	
12	Параметр (характер) нагрузки	
13	Частота коммутации, Гц	
14	Число коммутационных циклов	
15	Время непрерывного нахождения обмотки под напряжением, ч	
16	Время суммарного нахождения обмотки под напряжением, ч	
17	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 78		
Электромагнитные реле максимального тока и электротепловые токовые реле		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Режим работы главной цепи, номинальное напряжение, В	
2	Режим работы главной цепи, частота тока, Гц	
3	Режим работы главной цепи, номинальный ток, А	
4	Режим работы главной цепи, установка номинального тока, А	
5	Режим работы главной цепи, установка тока срабатывания, $I/I_{ном.}$	
6	Режим работы главной цепи, перегрузка по току, $I/I_{ном.}$	
7	Режим работы главной цепи, длительность перегрузки по току, с	
8	Режим работы контактов, номера выводов	
9	Режим работы контактов, частота тока, Гц	
10	Режим работы контактов, номинальное напряжение, В	
11	Режим работы контактов, коммутируемый ток, А	
12	Режим работы контактов, параметр (характер) нагрузки	
13	Режим работы контактов, количество срабатывания	
14	Коэффициент нагрузки	

ФОРМА 79		
Реле времени		
	Наименование параметра	**Значение**
1	Рабочее напряжение, В	
2	Потребляемый ток до срабатывания, мА	
3	Потребляемый ток после срабатывания, мА	
4	Время срабатывания, с	
5	Время восстановления, с	
6	Время подготовки, с	
7	Коммутируемое напряжение, минимальное, В	
8	Коммутируемое напряжение, максимальное, В	
9	Коммутируемый ток, минимальный, А	
10	Коммутируемый ток, максимальный, А	
11	Максимальная коммутируемая мощность, Вт (ВА)	
12	Род тока (постоянный, переменный)	

13	Параметр (характер) нагрузки	
14	Число коммутационных циклов	
15	Частота коммутации	
16	Непрерывное пребывание под рабочим напряжением во включенном состоянии, ч	
17	Суммарное пребывание под рабочим напряжением во включенном состоянии, ч	
18	Коэффициент нагрузки	

Приложение Б
(справочное)

Пример комплексного анализа надежности

В качестве примера анализа показателей безотказности ПУ на основе комплексного моделирования физических процессов рассматривают процесс разработки ПУ, в ТЗ на который предусмотрено обеспечение безотказной работы ПУ в течение 10 000 ч с вероятностью не менее 0,95.

Вначале разрабатывают электрическую схему и проводят анализ электрических характеристик в системе PSpice. Затем в системе P-CAD формируют конструкцию ПУ.

В подсистеме АСОНИКА-ТМ конструкция ПУ конвертируется из системы P-CAD (рисунок Б.1) и проводят моделирование тепловых и механических характеристик ПУ.

Результаты моделирования тепловых режимов показаны на рисунке Б.2. По данным результатам автоматически формируются КРР ЭРИ в подсистеме АСОНИКА-Р (рисунки Б.3—Б.5). При этом температуры и ускорения ЭРИ переносятся в подсистему АСОНИКА-Р из подсистемы АСОНИКА-ТМ, а токи и напряжения — из системы PSpice. Кроме того, конвертор PSpice — АСОНИКА-Р рассчитывает мощности тепловыделения каждого электронного компонента.

В подсистеме АСОНИКА-Б конструкция ПУ извлекается из системы P-CAD (перечень ЭРИ), а значения токов, напряжений, температур импортируются из подсистем АСОНИКА-Р и АСОНИКА-ТМ.

С учетом реальных режимов работы рассчитывают показатели безотказности ПУ (рисунок Б.6). По результатам этого расчета в подсистеме АСОНИКА-Б было определено, что вероятность безотказной работы ПУ в течение 10 000 ч составляет 0,92, что не отвечает требованиям ТЗ.

Из диаграмм вкладов ЭРИ в общую безотказность ПУ (рисунки Б.7 и Б.8) видно, что наименьшей надежностью обладают диод V1 и резистор R2.

Чтобы повысить отказоустойчивость ПУ, было решено понизить нагрузки на диод V1 и внести соответствующие изменения в схему ПУ. Для повышения отказоустойчивости резистора были приняты два решения: понизить температуру путем перекомпоновки ЭРИ, а также ввести резервирование (рисунок Б.9).

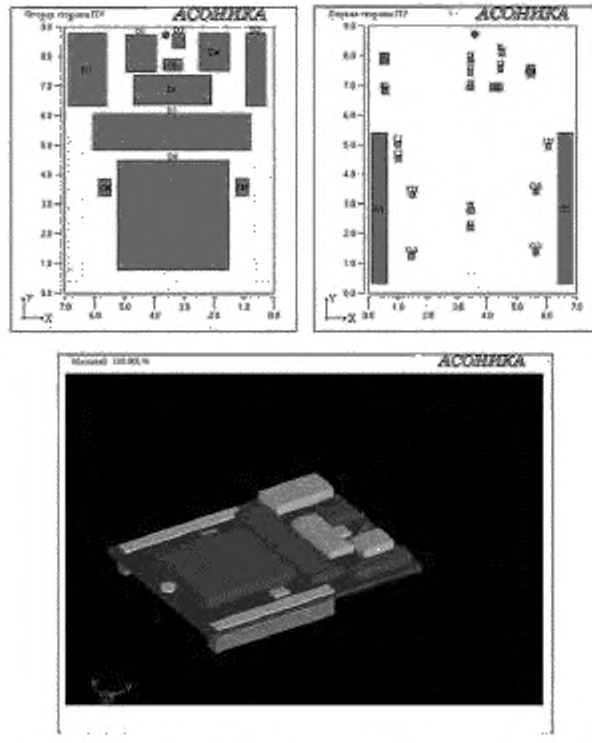

Рисунок Б.1 — Конструкция ПУ, конвертированная из системы P-CAD

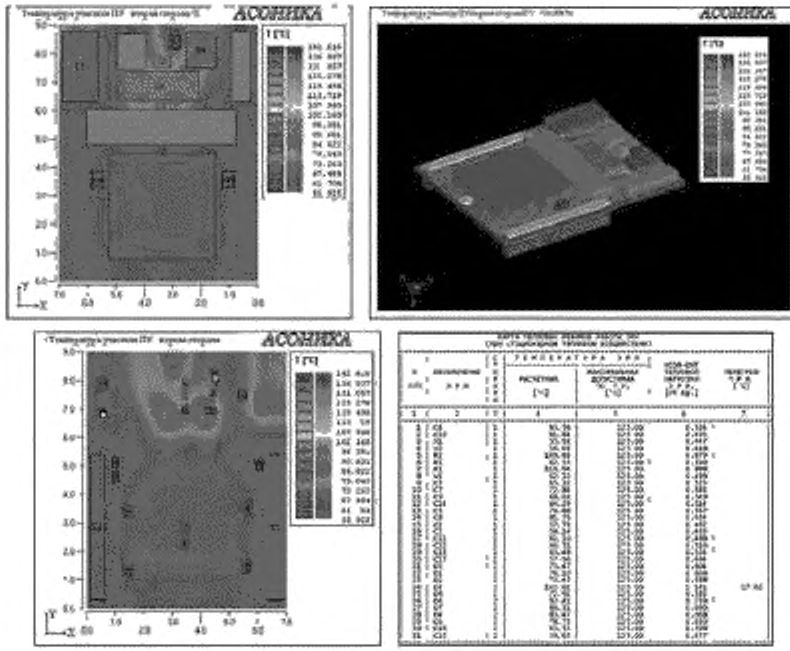

Рисунок Б.2 — Результаты моделирования тепловых режимов



Рисунок Б.3 — Диалоговое окно для формирования КРР

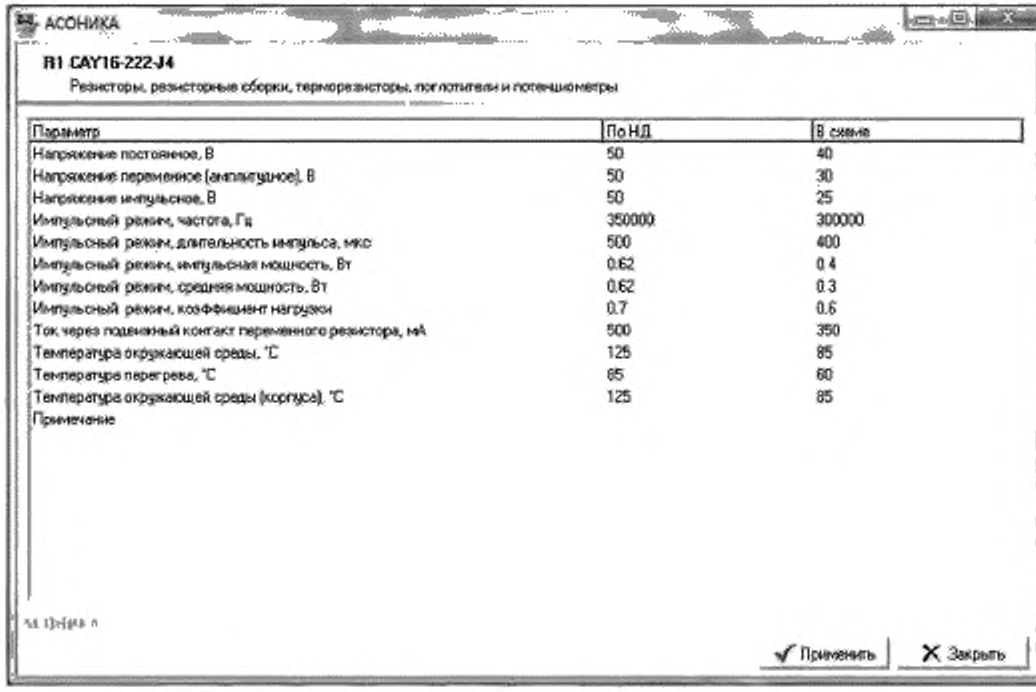

Рисунок Б.4 — Диалоговое окно для задания исходных данных в подсистеме АСОНИКА-Р

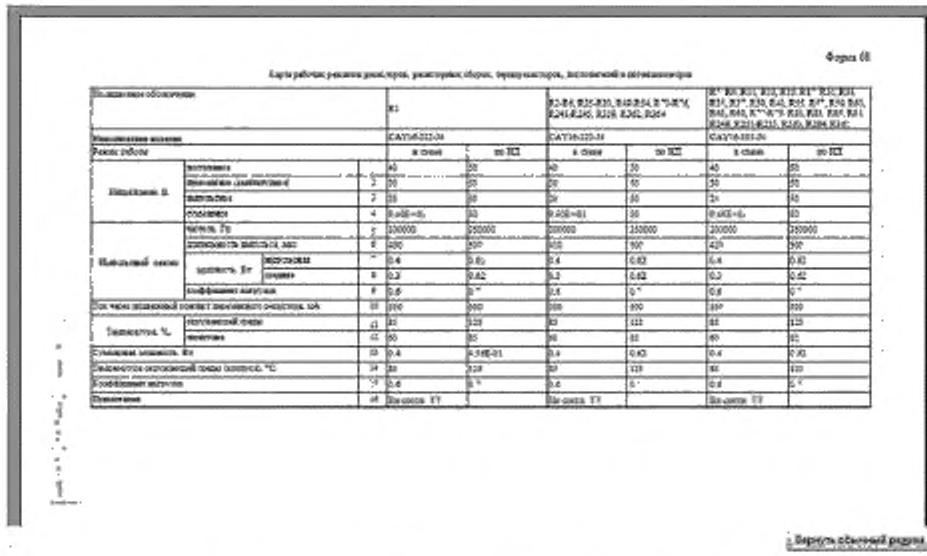

Рисунок Б.5 — Вывод КРР в подсистеме АСОНИКА-Р

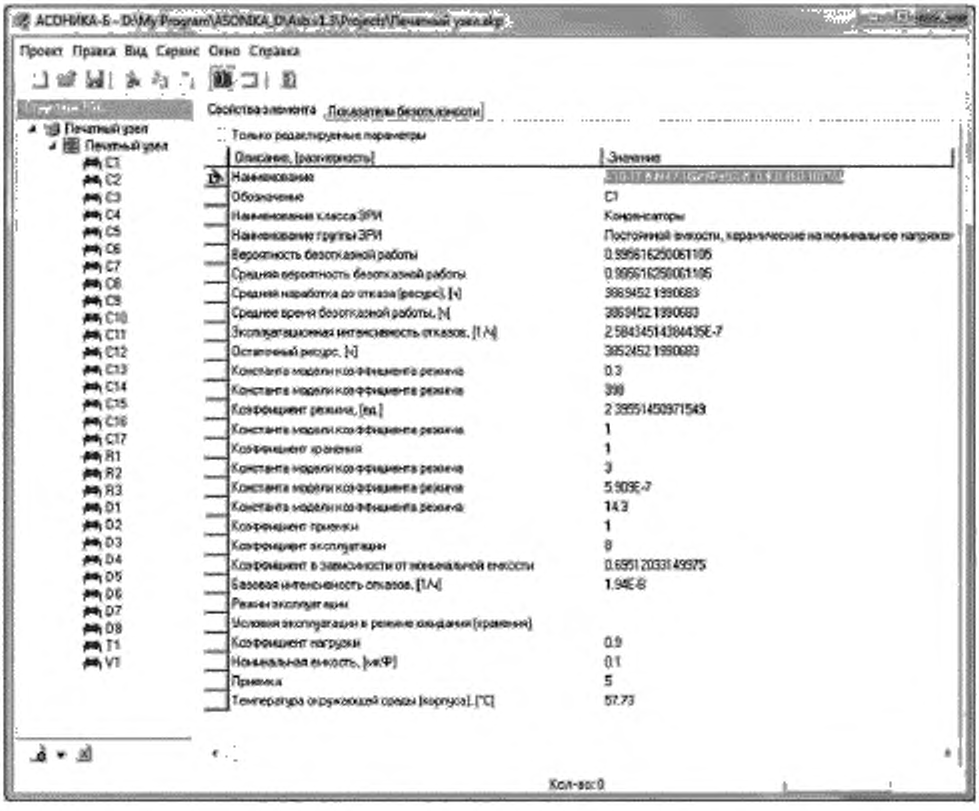

Рисунок Б.6 — Анализ показателей надежности в подсистеме АСОНИКА-Б: задание исходных данных

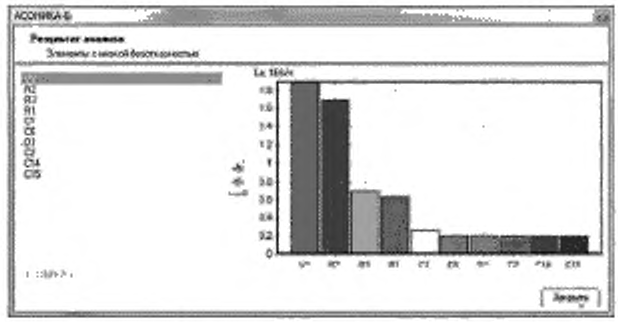

Рисунок Б.7 — Анализ показателей надежности в подсистеме АСОНИКА-Б: ЭРИ с низкой безотказностью

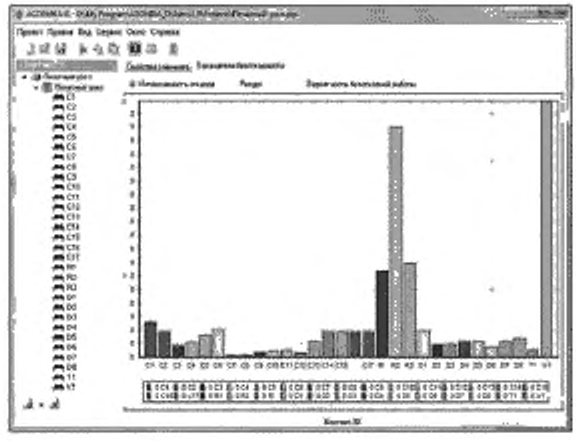

Рисунок Б.8 — Анализ показателей надежности в подсистеме АСОНИКА-Б: вклады ЭРИ в общую безотказность БЭ РТК

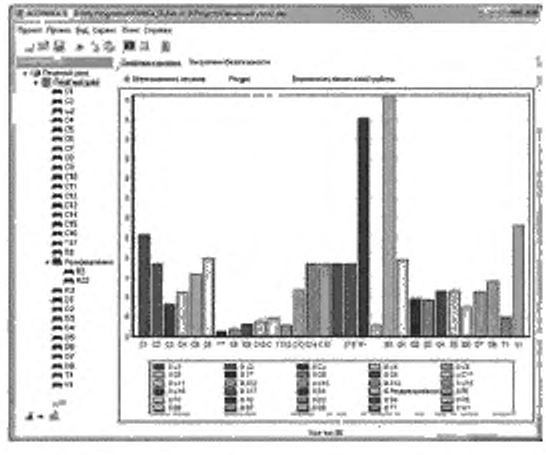

Рисунок Б.9 — Вклады ЭРИ в общую безотказность ПУ после оптимизации конструкции

Библиография

[1] Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий/Под ред. А.С. Шалумова. — М.: Радиотехника, 2013. — 424 с.

[2] Шалумов М.А., Шалумов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. — Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016.—87 с.

УДК 621.865:8:007.52:006.354 ОКС 35.020

Ключевые слова: робототехнические комплексы, метод моделирования, показатели надежности, виртуализация испытаний, базовые элементы, проектирование

Редактор *Е.В. Зубарева*
Технический редактор *В.П. Прусакова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 11.01.2021. Подписано в печать 27.01.2021. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 2,98.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru