

Таблица 1. Функция состояния резервированных групп

Вид группы	Функция состояния
«Последовательное соединение» элементов	$y = e_1 \cap e_2 \cap \dots \cap e_N$
«Параллельное соединение» элементов (нагруженный резерв)	$y = e_1 \cup e_2 \cup \dots \cup e_N$
Ненагруженный резерв	$y = e_{\text{раб.}} \cup e_{\text{резерв.}}$
Скользящее резервирование «N из M»	$y = \bigcup_{i=1}^M \bigcap_{n=i}^M (e_1, e_{i+1}, \dots, e_N)$

Функции состояния для сложных групп представляют собой сумму (дизъюнкцию) записанных алгебраически условий работоспособности (или объединение (конъюнкцию) условий отказа).

Для хранения «истории» изменения состояния элементов для каждого элемента создается двухэлементный массив (тип данных *bool*), содержащий флаг состояния (значение «истина» для работоспособного состояния или «ложь» для отказа) и значение времени наработки до акта изменения состояния (тип данных *double*).

Так как компоненты современных радиоэлектронных систем обладают высокой надежностью, то количество актов изменения состояния работоспособности будет невелико и объем оперативной памяти, занятый данными, также будет сравнительно небольшим.

Для работы с такими данными разработан класс, основным ядром которого являются две функции - конъюнкция и дизъюнкция последовательности «1» и «0», представляющих собой историю перехода состояний элементов из работоспособного состояния в отказ и наоборот, а также набор процедур подготовки и преобразования массивов с информацией.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что созданный инструментарий интегрирован в расчетный модуль системы АСОНИКА-К-СИ программного комплекса АСОНИКА-К. Использование новой версии системы АСОНИКА-К-СИ позволяет упростить верификацию формальных моделей сколь угодно сложных СРН резервированной восстанавливаемой аппаратуры при расчетах показателей безотказности и ремонтпригодности.

При расчете принят в рассмотрение элемент, работающий тем, что...

Методы имитационного моделирования отказов радиоэлектронной аппаратуры

Жаднов В.В.

Московский государственный институт электроники и математики
Кафедра «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы»

В соответствии с ГОСТ 27.301 [1] универсальным методом расчета показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является метод имитационного моделирования. В свою очередь, ГОСТ Р 51901.5 [2] рекомендует два метода имитационного моделирования – метод моментов и метод Монте-Карло. Первый метод требует построения модели РЭА в аналитическом виде (в виде полинома) и применяется, в основном, для расчетов допусков, поэтому здесь рассматриваться не будет.

Известные реализации метода Монте-Карло (например, [3]), применяемые для расчетов надежности, требуют построения унифицированной топологической модели надежности (УТМН) РЭА в виде соединения составных частей (СЧ). Параметры СЧ в такой модели характеризуют их состояние и представляются двоичной переменной: «1» - работоспособное, «0» - не работоспособное.

Поэтому такие методы, так же как и аналитические, позволяют рассчитать только один показатель надежности – вероятность безотказной работы (*P*). Что касается второго показателя – средней наработки до отказа (*T₀*), то для его оценки требуется формирование таблицы значений функции распределения - *F(t)*. Однако, при статистическом моделировании объем вычислительных затрат значительно возрастает и во много раз превышает аналогичные затраты аналитических методов [4].

Хотя для таких методов и разработаны специальные способы «ускорения» процесса моделирования (метод «взвешивания», метод «расслоения» и др.), но даже при их использовании затраты машинного времени остаются настолько высоки, что он практически не используется в инженерной практике для построения моделей отказов.

Однако, кроме «двоичной» оценки состояния РЭА и СЧ можно использовать в качестве параметров УТМН время работы до отказа. В этом случае УТМН может быть представлена как в виде соединения СЧ, так и в виде иерархического соединения резервированных групп.

В отличие от методов [3], где для получения *F(t)* требуется проведение *N* повторных расчетов модели для каждого значения *t₁, t₂, ..., t_N*, при использовании времени наработки до отказа потребуется всего лишь один расчет, в результате которого будет сформирован вектор наработок РЭА, размерность которого равна числу испытаний. В этом случае получение модели отказов может быть осуществлено с помощью методов математической статистики, а в первом приближении – путем построения гистограммы. Что касается расчета показателей надежности, то в данном случае определение вида функции *F(t)* просто не требуется, т.к. и *P* и *T₀* определяются непосредственно по вектору наработок РЭА:

$$P = \frac{m}{M}, \quad (1)$$

где: m – число испытаний, в которых отказа РЭА не произошло ($t_{РЭА} \geq t_i$), M – общее число испытаний.

$$T_0 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M t_{РЭА_i} \quad (2)$$

где: M – общее число испытаний; $t_{РЭА_i}$ – наработка РЭА в i -том испытании.

Таким образом, для получения и модели отказов, и показателей надёжности РЭА (P и T_0) необходимо сформировать вектор наработок РЭА $t_{РЭА1}, t_{РЭА2}, \dots, t_{РЭАM}$. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Как известно, основу статистического моделирования составляет имитационный эксперимент над формальной моделью. Формальная модель – это математическая модель, устанавливающая причинно-следственную связь между наработкой до отказа СЧ и РЭА в целом. Выходной характеристикой модели является непрерывная случайная величина, характеризующая наработку РЭА, коэффициентами модели – непрерывные случайные величины, характеризующая наработку СЧ, а параметрами элементов модели – функции распределения времени наработки до отказа СЧ.

Исходя из определения формальной модели и с позиций системного подхода, формальная модель надёжности РЭА может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1.

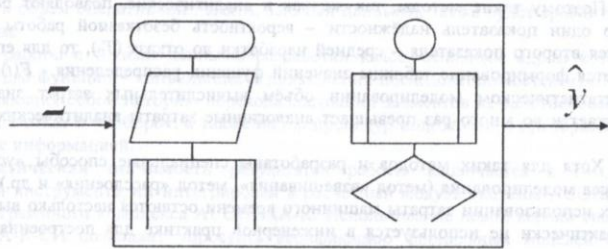


Рис. 1. Формальная модель надёжности РЭА

На рис 1 входным воздействием z является начало отсчета t_1 интервала времени $[t_1, t_2]$, в течение которого должны быть оценены показатели надёжности; выходной характеристикой y – временная диаграмма состояния (ВДС) РЭА на интервале $[0, \infty]$, а $Y(x)$ – сама формальная модель, параметрами которой x_1, x_2, \dots, x_m являются ВДС СЧ на интервале $[0, \infty]$.

Так как сущность статистического моделирования составляет проведение имитационного эксперимента на ЭВМ, то под $Y(x)$ в дальнейшем будем понимать некий алгоритм получения ВДС.

В этом случае, задачу автоматического построения формальной модели можно свести к задаче синтеза алгоритма построения временной диаграммы состояния РЭА. Очевидно, что каждую СЧ можно рассматривать как подсистему по отношению к системе (РЭА). Тогда в можно автоматически сформировать модель $Y(x)$ для заданной унифицированной топологической модели надёжности РЭА в виде иерархического соединения резервированных групп.

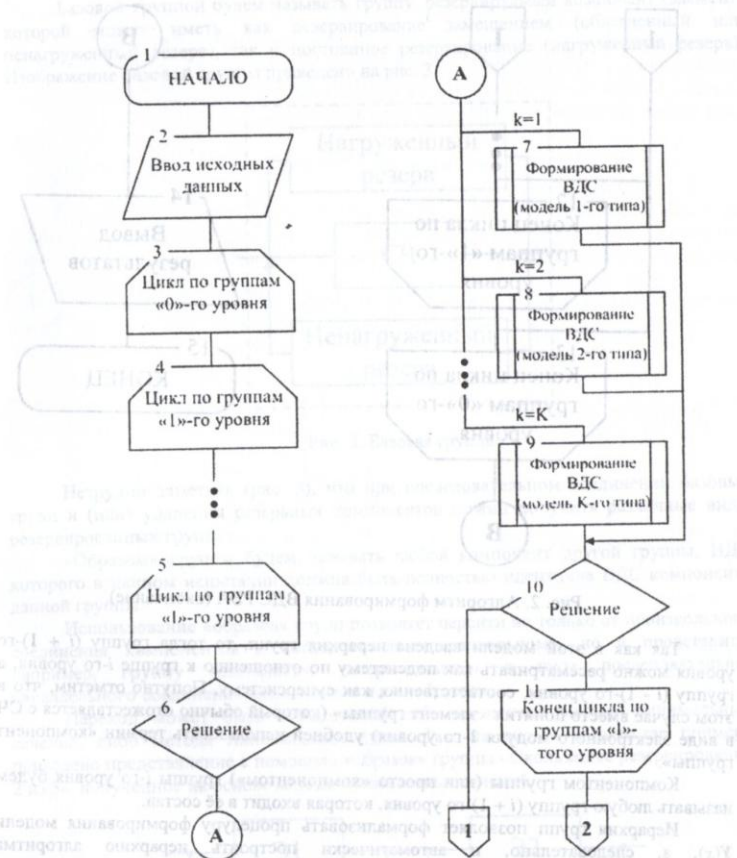


Рис. 2. Алгоритм формирования ВДС РЭА (начало)

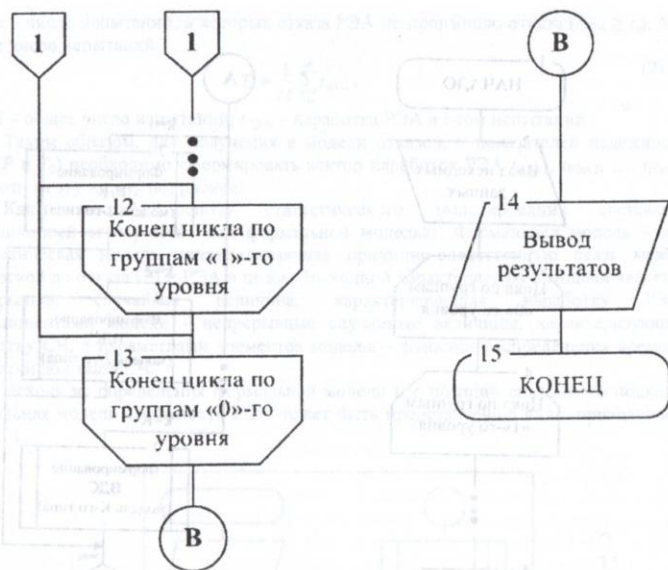


Рис. 2. Алгоритм формирования ВДС РЭА (окончание)

Так как в этой модели введена иерархия групп, то тогда группу $(i + 1)$ -го уровня можно рассматривать как подсистему по отношению к группе i -го уровня, а группу $(i - 1)$ -го уровня, соответственно, как суперсистему. Попутно отметим, что в этом случае вместо понятия «элемент группы» (который обычно отождествляется с СЧ в виде электронного модуля 1-го уровня) удобней использовать термин «компонент группы».

Компонентом группы (или просто «компонентом») группы i -го уровня будем называть любую группу $(i + 1)$ -го уровня, которая входит в её состав.

Иерархия групп позволяет формализовать процедуру формирования модели $Y(x)$, а, следовательно, и автоматически построить иерархию алгоритма формирования ВДС РЭА по заданной УТМН РЭА в виде иерархического соединения групп. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

В отличие от традиционного представления УТМН РЭА в виде соединения СЧ, в данном случае любой компонент группы i -го уровня, может представлять собой как СЧ, так и группу, уровень которой $\geq (i + 1)$ -го. Это позволяет представить модель $Y(x)$ любого уровня в виде последовательного соединения групп данного уровня.

Другой особенностью алгоритма (рис. 2) является блок формирования ВДС группы. По сути, он и представляет собой модель $Y(x)$ группы. Прежде чем переходить к формальной модели группы введем понятия «базовая группа» и «образ группы».

Базовой группой будем называть группу, резервируемый компонент (элемент) которой может иметь как резервирование замещением (облегченный или ненагруженный резерв), так и постоянное резервирование (нагруженный резерв). Изображение базовой группы приведено на рис. 3.



Рис. 3. Базовая группа

Нетрудно заметить (рис. 3), что при последовательном соединении базовых групп и (или) удалении резервных компонентов можно получить различные виды резервированных групп.

«Образом» группы будем называть любой компонент другой группы, ВДС которого в данном испытании должна быть полностью идентична ВДС компонента данной группы.

Использование «образов» групп позволяет перейти не только от произвольного соединения компонентов к последовательно-параллельному, но и представить, например, группу «скользящее резервирование» в виде последовательно-параллельного соединения компонентов и их «образов».

Переход может быть осуществлен либо на основе метода минимальных сечений, либо метода минимальных путей. Так, на рис. 4 в качестве примера приведено представление с помощью «образов» группы «Скользящее резервирование 2 из 3», полученное на основе метода минимальных сечений.

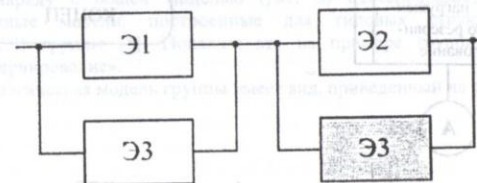


Рис. 4. Представление группы «Скользящее резервирование» с помощью «образов»

Таким образом, любая группа i -го уровня, может быть представлена в виде последовательного соединения базовых групп, состоящих из компонентов и их образов. Исходя из этого, нетрудно представить формальную модель группы в виде следующего алгоритма формирования ВДС (рис. 5).

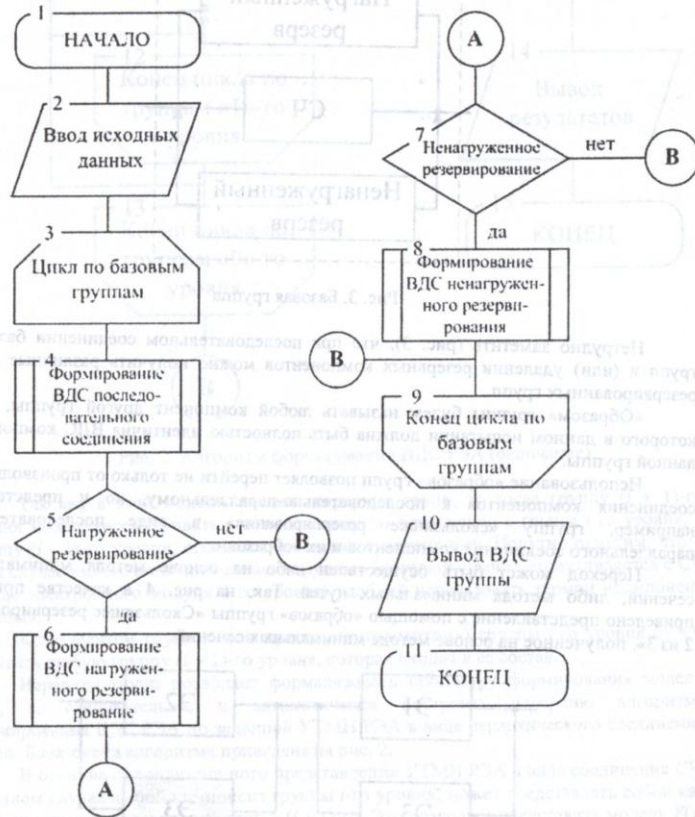


Рис. 5. Алгоритм формирования ВДС группы

Очевидно, что элементарной группой (группой самого низкого, 1 -го уровня) будет являться «базовая» группа, в состав которой входят только СЧ (ЭМ1), ВДС

которых являются параметрами модели $Y(x)$. Покажем, как формируется ВДС такой группы.

Пусть топологическая модель группы имеет вид, приведенный на рис. 3. Резервируемая СЧ имеет нагруженный резерв, состоящий из одной СЧ^{НР}, и ненагруженный резерв, состоящий также из одной СЧ (СЧ^{ННР}).

Характеристики надежности СЧ в режиме эксплуатации:
СЧ - λ_1 , СЧ^{НР} - λ_2 , СЧ^{ННР} - λ_3 .

Характеристики надежности СЧ^{ННР} в режиме хранения:
СЧ^{ННР} - λ_4 .

Тогда формирование ВДС группы проводится в следующей последовательности.

1) Формирование ВДС СЧ. В данном случае для формирования ВДС достаточно рассчитать реализацию времени наработки до отказа t_1, t_2, t_3 для режима эксплуатации и t_4 для режима хранения.

2) Формирование ВДС группы «нагруженное резервирование». Так как критерием отказа такой группы является отказ всех элементов (СЧ и СЧ^{НР}), то её время наработки до отказа (t_5) будет равно:

$$\hat{t}_5 = \max\{t_1, t_2\}. \quad (4)$$

3) Формирование ВДС всей группы. Так как СЧ^{ННР} переводится в рабочий режим после отказа СЧ и СЧ^{НР}, то время наработки до отказа всей группы (t) определяется как:

$$\hat{t} = \begin{cases} \hat{t}_5, & \forall \partial \hat{t}_4 \leq \hat{t}_5; \\ \hat{t}_5 + \hat{t}_3, & \forall \partial \hat{t}_4 > \hat{t}_5. \end{cases} \quad (5)$$

Рис. 6 поясняет формирование ВДС элементарной группы для двух случаев: $t_4 \geq t_5$ а) и $t_4 \leq t_5$ б).

Алгоритмы (рис. 2 и 5) в совокупности представляют собой алгоритмическую модель, которая может быть автоматически построена по заданной номенклатуре и иерархии базовых групп (УНТМ виде иерархического соединения групп).

Другое дело, что количество базовых групп при таком построении модели может оказаться достаточно большим. Если принять во внимание, что моделирование ВДС содержит циклы по группам разных уровней, то время одного имитационного эксперимента из-за этого может существенно возрасти.

Кроме того, большее количество базовых групп затрудняет восприятие модели, что также может привести к ошибкам при ее вводе в ЭВМ не только в текстовом, но и графическом режиме.

Поэтому, наряду с общей моделью (рис. 3) целесообразно использовать специализированные модели, построенные для типовых структурных схем надежности (ССН) группы [5]. Покажем это на примере группы «скользящее нагруженное резервирование».

Пусть топологическая модель группы имеет вид, приведенный на рис. 7.

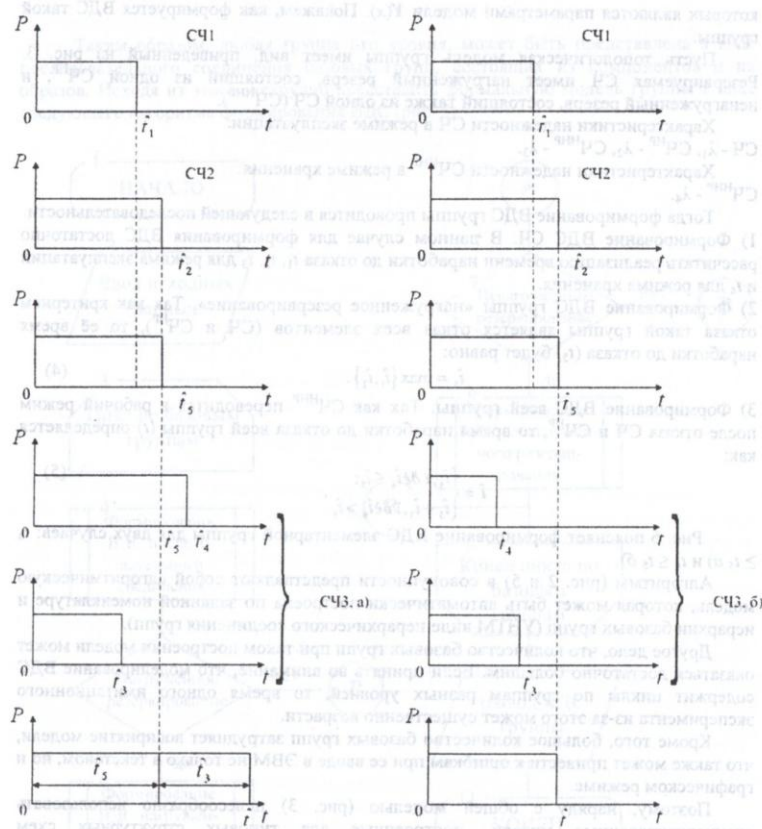


Рис. 6. Формирование ВДС базовой группы

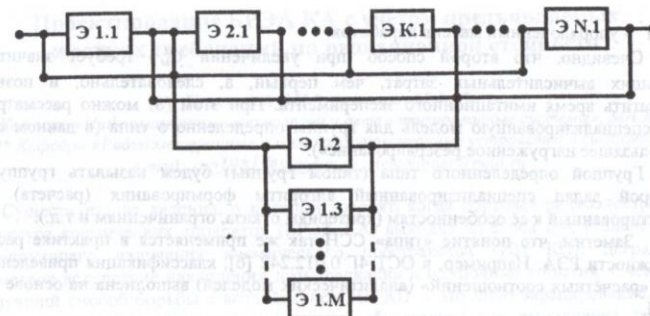


Рис. 27. Унифицированная топологическая модель группы «Скользящее нагруженное резервирование»

Группа «скользящее нагруженное резервирование» (см. рис. 7) содержит N основных компонентов ($\text{Э}1.1, \text{Э}2.1, \dots, \text{Э}N.1$) и M резервных компонентов ($\text{Э}1.1, \text{Э}1.2, \dots, \text{Э}1.M$). Общее число компонентов: $L = N + M$.

Рассмотрим решение задачи формирования ВДС группы на основе использования метода «базовых» групп.

1) На основе метода минимальных сечений сформируем K групп «нагруженное резервирование» ($K = C_u^L$), каждая из которых содержит N компонентов и (или) «образов».

2) Для каждой (k -той) группы сформируем ВДС (время наработки до отказа):

$$\hat{t}_k = \max_{n=1, N} \{ \hat{t}_{1,k}, \hat{t}_{2,k}, \dots, \hat{t}_{N,k} \}. \quad (6)$$

3) Так как соединение этих групп, в свою очередь, представляет собой «последовательное соединение» K компонентов (групп «нагруженное резервирование»), то ВДС (время наработки до отказа) всей группы (\hat{t}) определяется как:

$$\hat{t} = \min_{n=1, K} \{ \hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_K \}. \quad (7)$$

Однако, возможен и другой способ формирования ВДС (расчёта времени наработки до отказа).

Как известно, критерием отказа группы «нагруженное резервирование» является отказ $K = (N + 1)$ компонентов. Исходя из этого, вместо формирования ВДС «базовых» групп (6) можно сразу сформировать ВДС группы.

1) Массив (T) реализаций наработок компонентов $\{t_{\text{Э}1.1}, t_{\text{Э}2.1}, \dots, t_{\text{Э}M.1}, t_{\text{Э}1.1}, t_{\text{Э}1.2}, \dots, t_{\text{Э}1.M}\}$ упорядочивается в порядке возрастания.

2) Так как отказом группы является отказ K компонентов, то время наработки до отказа всей группы (\hat{t}) будет численно равно K -тому элементу упорядоченного массива наработок (T):

$$\hat{t} = \hat{t}_{l=K} \in \hat{T}, \quad (8)$$

где T – упорядоченный массив наработок.

Очевидно, что второй способ (при увеличении C_m^+) требует значительно меньших вычислительных затрат, чем первый, а, следовательно, и позволяет сократить время имитационного эксперимента. При этом (8) можно рассматривать как специализированную модель для группы определенного типа (в данном случае «скользящее нагруженное резервирование»).

Группой определенного типа (типом группы) будем называть группу, для которой задан специализированный алгоритм формирования (расчета) ВДС, адаптированный к её особенностям (критериям отказа, ограничениям и т.д.).

Заметим, что понятие «типа» ССН так же применяется в практике расчетов надежности РЭА. Например, в ОСТ 4Г 0.012.242 [6], классификация приведенных в нем «расчётных соотношений» (аналитических моделей) выполнена на основе типов ССН.

Таким образом, использование иерархии групп совместно с понятием «группы определенного типа» позволяет формализовать правила представления логической модели надёжности РЭА в виде «унифицированной топологической модели надёжности» и на этой основе автоматически формировать физическую (формальную) модель для имитационного эксперимента над РЭА в целом.

Литература

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
2. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
3. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование телекоммуникационных сетей. Учебное пособие. - СПб.: ГОУВПО «ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 1999. - 88 с.
4. Жаднов В.В., Жаднов И.В., Полесский С.Н. Современные проблемы автоматизации расчетов надежности. / Надежность. № 2 (21), 2007. - с. 3-12.
5. Полесский С. Жаднов В. Обеспечение надежности НКРТС. - LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 280 p.
6. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчёта показателей надёжности.

Проектирование БРЭА КА с учетом предъявляемых жестких требований по радиационной стойкости

Полесский С.Н.*, Артохова М.А.**

*Кафедра «Информационные технологии и автоматизированные системы», МИЭМ

** Кафедра «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы»

e-mail: snp1981@yandex.ru, sightblinder@mail.ru

Существует два явления, о которых говорят, когда бортовая радиоэлектронная аппаратура космических аппаратов (БРЭА КА) выходит из строя под воздействием ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП): деградация параметров вследствие накопления дозы радиации и одиночные события. Очевидно, что лучший способ борьбы с воздействием ИИ КП – это либо экранирование, либо уменьшение электроники до минимума, необходимого для выполнения работы. Однако, это противоречит преобладающим сегодня тенденциям: конструированию негерметизированных унифицированных космических платформ и, как правило, стремление выполнять даже простейшие функции управления с помощью цифровых схем.

Для уменьшения величины набранной аппаратурой дозы применяются следующие методы: конструктивный и программный. Конструктивный, другими словами, экранирование – подразумевает применение локальных экранов и теневой защиты. Первое означает, что критичные узлы закрываются локальными экранами. Существует даже возможность экранировать отдельные микросхемы, создавая нечто, аналогичное gad-hard корпусу. Теневая защита подразумевает использование элементов конструкции для создания «тени» – области, в которой уровень накопленной дозы меньше, чем вне ее. В этой области целесообразно размещать критичные узлы. Для вычисления таких областей применяется метод секторирования (лучевой метод), о котором будет подробнее рассказано далее.

В сложившейся ситуации актуально создание методики, которая объединит специалистов в области радиационной стойкости и разработчиков БРЭА, позволив последним избежать большого количества итераций на стадии доработки БРЭА.

Разрабатываемая методика позволит: рассчитать прогнозируемые величины и положение локальных экранов, оценить необходимые и достаточные величины защиты со стороны элементов конструкции, повысить точность оценки дозовой нагрузки на элементах и, главное, провести оптимизацию компоновки с учетом воздействия ИИ КП на ранних стадиях проектирования.

Исходными данными для расчетной оценки прогнозируемой радиационной стойкости бортовой аппаратуры являются техническое задание, нормативно-техническая документация, технические условия на ЭРИ, принципиальная электрическая схема. Они берутся за основу при анализе электронной компонентной базы (ЭКБ) по предельной накопленной дозе, расчетах частоты возникновения одиночных сбоях и вероятности возникновения катастрофического отказа. Исходные данные являются основой для получения информации о радиационной обстановке на орбите функционирования КА и для задания требований к конструктивному исполнению БА, требований по устойчивости БА к внешним воздействующим факторам (ВВФ) и требований к ЭКБ.