

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

В. Б. РУДАКОВ¹, А. С. БУРЦЕВ¹, П. А. ФИЛОНЕНКО¹, В. А. МИРОНИЧЕВ²

¹ „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“,
141091, Московская область, г. Юбилейный, Россия
E-mail: baklanov@niiks.com

² Государственная корпорация по космической деятельности „Роскосмос“, 129110, Москва, Россия

Ионизирующие излучения космического пространства являются основным фактором, влияющим на надежность космических аппаратов. В настоящее время воздействие ионизирующих излучений при расчете надежности не учитывается, так как, согласно нормативным документам, такой учет проводится только при отсутствии требований по стойкости электрорадиоизделий. Предложены две математические модели, учитывающие возрастающий характер интенсивности отказов электрорадиоизделий при воздействии ионизирующего излучения космического пространства как функции от времени. Первая модель позволяет проводить оценку надежности аппаратуры, структурная схема которой содержит ненагруженный резерв. Использование второй модели позволяет за счет учета априорной информации о надежности сократить объемы испытаний аппаратуры космических аппаратов при наземной отработке.

Ключевые слова: надежность, космические аппараты, сокращенные испытания, ионизирующие излучения

Ионизирующие излучения (ИИ) космического пространства (КП) в настоящее время являются основным фактором, влияющим на надежность космических аппаратов (КА). Анализ работ по оценке и обеспечению надежности КА и его составных частей показывает, что при длительных сроках активного существования до 50 % всех отказов в ходе эксплуатации КА происходит из-за воздействия ионизирующих излучений космического пространства [1–6].

Воздействие ИИ КП в основном связано с дозовыми эффектами, возникающими в результате накопления в материалах поглощенной дозы излучения, а также при возникновении одиночных эффектов в результате воздействия высокоэнергетических частиц* [4]. Накопление в материалах составных частей КА поглощенной дозы приводит к отказам вследствие ускорения процессов деградации характеристик материалов электрорадиоизделий (ЭРИ) [4, 7–9]. Взаимодействие отдельных высокоэнергетических частиц с атомами вещества интегральных микросхем и полупроводниковых приборов приводит к сбоям и необратимым отказам [4, 9, 10].

Анализ методик оценки надежности КА показывает, что в настоящее время воздействие ИИ КП не учитывается** [11, 12], так как, согласно нормативным документам РД 134-0139-2005, ОСТ 134-1034-2012, учет воздействия ИИ КП на надежность ЭРИ проводится только при отсутствии соответствующих требований по стойкости. При этом методический аппарат по

* ОСТ 134-1044-2007.

РД 134-0139-2005.

** ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы.

РД 50-476-84 Методические указания. Надежность в технике. Интервальная оценка надежности технического объекта по результатам испытаний составных частей. Общие положения.

РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.

оценке надежности ЭРИ с учетом воздействия ИИ КП на основе радиационных испытаний, приведенный в стандарте ОСТ 134-1034-2012 и развитый в работах [2, 13, 16], предполагает, что интенсивность отказов ЭРИ в процессе эксплуатации КА в космическом пространстве постоянна ($\lambda = \text{const}$). Однако исследования [3, 17] показывают, что интенсивность отказов ЭРИ зависит от дозовой нагрузки ИИ КП. Вместе с тем скорость деградации свойств материалов ЭРИ является функцией энергии реакций, происходящих в материалах, она пропорциональна значению энергии этих реакций, вследствие чего механизмы отказов при воздействии ИИ низкой и высокой интенсивности различаются, что не учитываются при проведении наземных испытаний по методике ОСТ 134-1034-2012.

Кроме того, результаты испытаний по стандарту ОСТ 134-1034-2012 не позволяют:

— оценивать надежность аппаратуры КА, структурные схемы которой содержат ненагруженный резерв (пример: специальная аппаратура наблюдения КА дистанционного зондирования Земли, система управления бортовой платформы КА и т.д.);

— использовать оценки надежности ЭРИ, полученные по результатам испытаний, в качестве априорной информации при расчете надежности ЭРИ того же типоминнала, подвергающихся воздействию различных дозовых и иных нагрузок (это значительно удорожает проведение наземных испытаний комплектующих элементов, поскольку неучет априорной информации приводит к большим объемам испытаний).

Ниже представлены две математические модели, учитывающие возрастающий характер интенсивностей отказов ЭРИ при воздействии ИИ КП как функции от времени. Первая модель позволяет оценивать надежность аппаратуры, структурная схема которой содержит ненагруженный резерв. Использование второй модели позволяет за счет учета априорной информации о надежности сократить объемы испытаний аппаратуры КА при наземной отработке.

Математическая модель оценки надежности модулей аппаратуры космического назначения, содержащей ненагруженный резерв и подвергающейся длительному воздействию ИИ КП. Для оценивания надежности резервированных систем с ненагруженным резервом численным методом получена математическая зависимость общего вида. Вывод зависимости проведен методом математической индукции, начиная со схемы с однократным резервированием, приведенной на рис. 1, где t — требуемая длительность функционирования первого (нагруженного) структурного звена; $P_1 = P_{\text{раб}}(t)$ — вероятность безотказной работы первого (нагруженного) структурного звена в течение требуемого времени t ; $P_2 = f\{P_{\text{хр}}(t_1), P_{\text{раб}}(t_2)\}$ — вероятность безотказной работы второго (ненагруженного) структурного звена в течение требуемого времени $t = t_1 + t_2$; t_1 — время нахождения второго (ненагруженного) структурного звена в режиме хранения до момента отказа первого (нагруженного) структурного звена; t_2 — время нахождения второго структурного звена в режиме работы, после того как отказало первое структурное звено; P — вероятность безотказной работы дублированной структурной схемы надежности с ненагруженным резервом в целом.



Рис. 1

Если обратиться к алгебре событий, то успешное выполнение заданной функции дублированной схемы с ненагруженным резервом (P) будет осуществлено, если безотказно проработает нагруженное структурное звено (P_1), либо, в случае его отказа (Q_1), безотказно включится (P_{2xp}) и проработает под нагрузкой (P_{2pab}) второе структурное звено. Математически событие успешного выполнения заданной функции можно записать в виде:

$$P = P_1 \vee Q_1 \wedge P_{2xp} \wedge P_{2pab}. \quad (1)$$

Вероятность совместного наступления событий $Q_1 \wedge P_{2xp} \wedge P_{2pab}$ определяется следующим образом (схема всех возможных событий приведена на рис. 2).

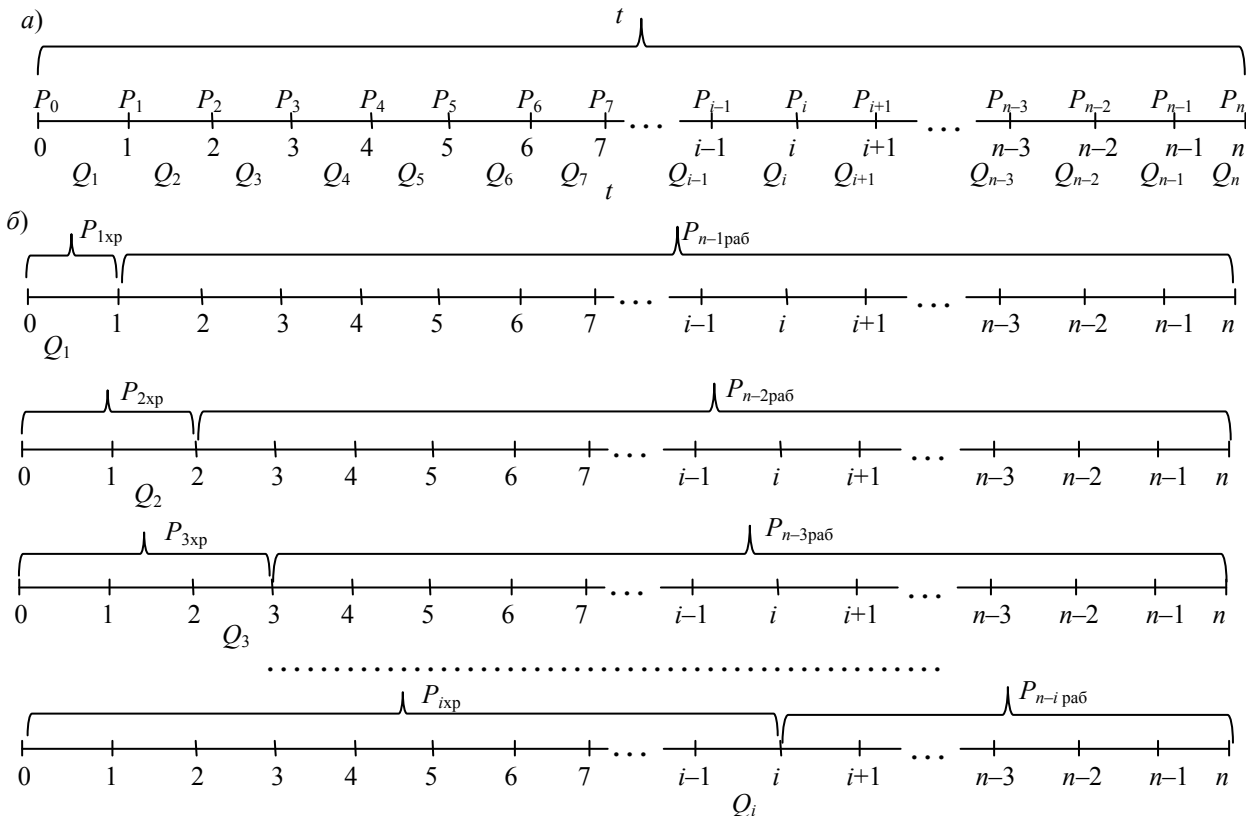


Рис. 2

Все время функционирования разбивается на достаточно малые (порядка 10^{-3} — 10^{-4} с) интервалы числом n . Для первого звена (рис. 2, а) концу каждого интервала времени $[0, n]$ будет соответствовать событие, заключающееся в том, что первое (нагруженное) звено безотказно проработало соответствующее количество интервалов времени t_0, t_1, \dots, t_n с соответствующими вероятностями P_0, P_1, \dots, P_n либо отказало на соответствующем интервале времени с соответствующими вероятностями Q_0, Q_1, \dots, Q_n .

В отношении второго (ненагруженного) звена (рис. 2, б) имеют место следующие события, ведущие к успешному выполнению заданных функций. При наступлении события отказа первого (нагруженного) звена на i -м интервале времени (Q_i) второе (ненагруженное) звено сохранит работоспособность в режиме хранения (P_{ixp}) и безотказно проработает в течение $(n-i)$ интервалов времени до конца срока эксплуатации $T_{a.c.}$.

С учетом вышеизложенных рассуждений, в предположении, что при отказе первого (нагруженного) структурного звена на соответствующем интервале времени включение второго (ненагруженного) звена наступает в конце этого же интервала времени, формула (1) принимает следующий вид:

$$P = P_1 \vee Q_1 \wedge P_{1\text{xp}} \wedge P_{n-1\text{раб}} \vee Q_2 \wedge P_{2\text{xp}} \wedge P_{n-2\text{раб}} \vee \dots$$

$$\dots \vee Q_n \wedge P_{n\text{xp}} \wedge P_{n\text{раб}} = P_1 \vee \sum_{i=1}^n Q_i \wedge P_{i\text{xp}} \wedge P_{n-i\text{раб}}. \quad (2)$$

При переходе к вероятностям формула (2) принимает вид:

$$P = P_{\text{раб}}(t) + \sum_{i=1}^n q_i p_{i\text{xp}} p_{n-i\text{раб}}. \quad (3)$$

В соответствии с теорией восстановлений [18] вероятность отказа первого структурного звена на i -м интервале времени рассчитывается по формуле:

$$q_i = |p_{i-1} - p_i|, \quad (4)$$

где p_{i-1} , p_i — вероятности безотказной работы первого (нагруженного) структурного звена за интервалы времени $(i-1)$ и i соответственно. При этом $p_0 = 1$.

Окончательно для всей дублированной схемы с ненагруженным резервом в условиях возрастающей интенсивности отказов получим следующую формулу:

$$P = P_{\text{раб}}(t) + \sum_{i=1}^n (p_{i-1} - p_i) p_{i\text{xp}} p_{n-i\text{раб}}, \quad (5)$$

пригодную для расчетов надежности дублированной схемы с ненагруженным резервом при любых законах распределения наработок элементов до отказа.

При одинаковых характеристиках надежности второго звена в нагруженном и ненагруженном состоянии (т.е. при режиме, эквивалентном нагруженному резерву) формула принимает вид:

$$P = P_{\text{раб}}(t) + \sum_{i=1}^n (p_{i-1} - p_i) P_{\text{раб}}(t) =$$

$$= P_{\text{раб}}(t) + P_{\text{раб}}(t)(p_0 - p_1 + p_1 - p_2 + \dots + p_{n-1} - p_n) =$$

$$= P_{\text{раб}}(t) + P_{\text{раб}}(t)(p_0 - p_n) = P_{\text{раб}}(t) + P_{\text{раб}}(t)(1 - p_n) =$$

$$= P_{\text{раб}}(t) + P_{\text{раб}}(t) Q_{\text{раб}}(t) = P_{\text{раб}}(t) + (1 - Q_{\text{раб}}(t)) Q_{\text{раб}}(t) =$$

$$= P_{\text{раб}}(t) + Q_{\text{раб}}(t) - Q_{\text{раб}}^2(t) = 1 - Q_{\text{раб}}^2(t).$$

Расчетное соотношение для дублированной схемы с нагруженным резервом (6) подтверждает адекватность модели (5).

Величина среднеквадратического отклонения для выражения (5) определяется по приближенной формуле:

$$\sigma_P \approx \sqrt{\frac{\hat{P}(1 - \hat{P})}{n - 1}}, \quad (7)$$

где „ $\hat{}$ “ означает оценку значения.

Формулы (5), (7), полученные с помощью алгебры событий, позволяют рассчитывать характеристики надежности резервированных систем с ненагруженным резервом, что очень важно для аппаратуры КА. Аналогичным образом выводятся математические зависимости явного вида для любого n -кратного резервирования с ненагруженным резервом.

Математическая модель учета априорной информации при оценке надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения. Для случаев малых объемов испытаний при расчете оценок надежности и их точности в зависимости от вида оборудования применяются параметрические и непараметрические методы оценок. Ниже рассмотрен параметрический метод максимального правдоподобия для статистического оценивания надежности

изделий по результатам испытаний. Этот метод основан на подборе параметров распределения заданного вида, при которых получение анализируемой выборки наиболее вероятно.

Метод максимального правдоподобия используется для получения оценок надежности по результатам испытаний, проводимых по плану $[NUz]$, где N — число испытываемых изделий, U — восстановление изделий не производится, z — испытания прекращаются по достижении заданной наработкой z_i каждого изделия [19]:

$$z_i = \min(t_i, \tau_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

где t_i — наработка до отказа i -го изделия; τ_i — наработка до снятия с испытаний работоспособного i -го изделия.

По результатам испытаний должны быть получены цензурированные выборки, когда исходные данные для расчета надежности представлены наработками отказавших и работоспособных изделий:

$$t_1, t_2, \dots, t_r, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \quad (9)$$

где $t(i = \overline{1, r})$ — наработки изделий до отказа (на отказ); $\tau(j = \overline{1, n})$ — наработки работоспособных изделий.

Если конструктивно одинаковые изделия испытываются в одинаковых условиях, априорная информация о результатах испытаний в виде цензурированной выборки используется для увеличения объема выборки, полученной по результатам испытаний (9). Если условия испытаний изделий различаются, учет априорной информации производится после расчета показателей надежности по модели [4]:

$$\hat{R} = r\hat{R}_{об} + (1-r)\hat{R}_и, \quad (10)$$

где \hat{R} — оценка показателя надежности, вычисленная с учетом априорной информации; $\hat{R}_{об}$ — оценка показателя надежности, полученная объединением оценки по результатам испытаний $\hat{R}_и$ и априорной оценки; r — оценка вероятности того, что статистические данные, полученные по результатам испытаний и использованные для расчета априорной оценки надежности, принадлежат к одной генеральной совокупности.

Под наработкой изделий до отказа понимается наработка изделий, отказавших в какой-либо момент времени подготовки к пуску, пуска и полета. Под наработками работоспособных изделий понимается наработка изделий, безотказно проработавших в период подготовки к пуску, пуска и полета. Для оценки показателя $\hat{R}_и$ рассмотрим три основных закона распределения наработок до отказа — экспоненциальный, Вейбулла и нормальный, которые наиболее характерны для аппаратуры КА. Наиболее часто применяется закон распределения Вейбулла (экспоненциальный закон является его частным случаем), он позволяет контролировать динамику показателей надежности.

В соответствии с этим законом оценка вероятности безотказной работы (вероятности сохранения работоспособного состояния изделия) за время t определяется параметрическим методом при распределении времени наработки изделия до отказа по формуле:

$$\hat{P}(t) = e^{(-\hat{a}^{\hat{b}} t^{\hat{b}})}, \quad (11)$$

где \hat{a} и \hat{b} — оценка параметров распределения Вейбулла.

Для получения среднеквадратического отклонения $\hat{P}(t)$ следует использовать приближенную формулу [4]:

$$\sigma_{\hat{P}} \approx \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \hat{a}}\right)^2 \sigma_{\hat{a}}^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \hat{b}}\right)^2 \sigma_{\hat{b}}^2}. \quad (12)$$

Оценка средней наработки изделия до отказа и ее среднеквадратическое отклонение находятся следующим образом [4]:

$$\hat{T}_{\text{cp}} = \hat{a}\Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{b}}\right), \quad \sigma_{\hat{T}_{\text{cp}}} = \hat{a}\sqrt{\Gamma\left(1 + 2/\hat{b}\right) - \left[\Gamma\left(1 + 1/\hat{b}\right)\right]^2}, \quad (13)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция, определяемая в соответствии с [20]:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \approx \sqrt{2\pi/x} e^{-x} x^x (1 + 1/12x). \quad (14)$$

Оценки параметров \hat{a} и \hat{b} вычисляются с использованием следующей итерационной процедуры [20]:

а) определяется начальное приближение оценки \hat{b}_0 по эмпирической формуле:

$$\hat{b}_0 = \frac{m+1}{\ln \frac{\prod_{i=1}^m t_i^{1/m}}{t_{(1)}} (0,23m + 3,75)}, \quad (15)$$

где $t_{(1)}$ — минимальное значение наработки до отказа;

б) определяется k -е приближение \hat{b}_k ($k \geq 1$) по рекуррентной формуле:

$$\hat{b}_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} \ln t_i + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}_{k-1}} \ln \tau_j}{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}_{k-1}} + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}_{k-1}}} - \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} \right); \quad (16)$$

в) итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполняться неравенство

$$\left| \frac{\hat{b}_k - \hat{b}_{k-1}}{\hat{b}_k} \right| \leq 0,01. \quad (17)$$

С учетом полученной оценки \hat{b} оценивается параметр \hat{a} :

$$\hat{a} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m t_i^{\hat{b}} + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}}}{m} \right)^{1/\hat{b}}. \quad (18)$$

Интенсивность отказов изделия определяется по эмпирической формуле [20]:

$$\hat{\lambda}(t) = \hat{a}^{-\hat{b}} \hat{b} t^{\hat{b}-1}. \quad (19)$$

Если $\hat{b} < 1$, то интенсивность отказов убывает, если $\hat{b} > 1$ — возрастает, т.е. эта оценка качественно характеризует динамику надежности изделий при испытаниях.

При $\hat{b} = 1$ вероятность безотказной работы изделия оценивается по формуле:

$$\hat{P}(t) = e^{-\hat{\lambda}t}, \quad (20)$$

где $\hat{\lambda}$ — оценка параметра потока отказов (интенсивности отказов) [20]:

$$\hat{\lambda} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{j=1}^n \tau_j^{\hat{b}}}. \quad (21)$$

Оценка средней наработки изделия до отказа и ее СКО в данном случае определяются из соотношений:

$$\hat{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{\hat{\lambda}}, \quad \sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}} = \frac{1}{\hat{\lambda}}. \quad (22)$$

Для случая нормального распределения наработок до отказа оценки параметров \hat{a} и $\hat{\sigma}$ определяются из уравнения максимального правдоподобия с помощью итерационной процедуры [20] с использованием системы уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_k = \frac{E + F_{k-1} - A\left(\frac{D - \Delta_{k-1}}{B}\right) + \sqrt{\left[E + F_{k-1} - A\left(\frac{D - \Delta_{k-1}}{B}\right)\right]^2 + 4r\left(C - \frac{A^2}{B}\right)}}{2r}, \\ \hat{a}_k = \frac{A}{B} + \left(\frac{D + \Delta_{k-1}}{B}\right)\hat{\sigma}_k, \end{cases} \quad (23)$$

где k — индекс итерации, $k = 0, 1, 2, \dots$;

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^r t_i + 0,64 \sum_{j=1}^n \tau_j, \quad B = r + 0,64n, \\ C &= \sum_{i=1}^r t_i^2 + 0,64 \sum_{j=1}^n \tau_j^2, \quad D = 0,8n, \quad E = 0,8 \sum_{i=1}^r \tau_i, \\ \Delta_k &= \sum_{j=1}^n \Delta_{jk}, \quad \Delta_0 = 0, \quad \Delta_{jk} = \lambda_{jk} - 0,8 - 0,64x_{jk}, \\ x_{jk} &= \frac{\tau_j - \hat{a}_k}{\hat{\sigma}_k}. \end{aligned} \quad (24)$$

Значения $\lambda_{jk} = \lambda(x_{jk})$ определяются по таблице интенсивностей отказов для нормального распределения.

Итерационная процедура поиска корней системы уравнений (23) заканчивается, когда достигнута требуемая точность решения ε :

$$\left| \frac{\hat{\sigma}_k - \hat{\sigma}_{k-1}}{\hat{\sigma}_k} \right| \leq \varepsilon, \quad \left| \frac{\hat{a}_k - \hat{a}_{k-1}}{\hat{a}_k} \right| \leq \varepsilon. \quad (25)$$

Оценка параметра \hat{a} в случае нормального распределения наработок до отказа является оценкой средней наработки до отказа $\hat{T}_{\text{ср}}$ [20]:

$$\hat{T}_{\text{ср}} = \hat{a}. \quad (26)$$

Интервальные оценки для показателей надежности, оцениваемых по методу максимального правдоподобия, определяются приближенно в предположении, что они распределены нормально [20]:

$$R_{\text{в,н}} = \hat{R} \pm U_{\beta} \sqrt{D(\hat{R})}, \quad (27)$$

где $R_{\text{в}}$ ($R_{\text{н}}$) — верхняя (нижняя) доверительная граница показателя надежности R ; U_{β} — квантиль нормального распределения для доверительной вероятности β ; $D(\hat{R})$ — дисперсия точечной оценки \hat{R} .

Таким образом, в результате выполнения программы „Мониторинг-СГ“ разработаны следующие математические модели оценки надежности, предназначенные для подтверждения указанных в техническом задании требований по надежности:

— математическая модель оценки надежности модулей аппаратуры космического назначения, содержащей ненагруженный резерв и подвергающейся длительному воздействию ИИ КП;

— математическая модель учета априорной информации при оценке надежности элементов и модулей аппаратуры космического назначения.

Проведенные расчеты показали целесообразность применения предложенных моделей для подтверждения заданных требований по надежности элементов и модулей радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на борту КА и функционирующей в условиях длительного (10 лет и более) воздействия ИИ КП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патраев В. Е., Трифанов И. В. Анализ показателей качества и надежности при эксплуатации современных космических аппаратов // Вестн. СибГАУ. 2010. № 2. С. 110—113.
2. Артюхова М. А. Влияние радиации на вероятность безотказной работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2013. № 2. С. 9—11.
3. Максимов И. А. Проблемы обеспечения надежного функционирования современных космических аппаратов в условиях дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства и факторов техногенного характера // Вестн. СибГАУ. 2010. № 4. С. 100—101.
4. Меньшиков В. А., Рудаков В. Б., Сычев В. Н. и др. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. Оптимизация и управление рисками. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.
5. Тестоедов Н. А., Двирный В. В., Морозов Е. А., Двирный Г. В., Еременко Н. В. Повышение долговечности приборов космических аппаратов // Вестн. СибГАУ. 2015 № 2. С. 430—437.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.
7. Мессенджер Д., Аш М. Радиационные эффекты в электронных системах. Кн. 1 / Пер. с англ. Перевод № 1803. М., 1988. 456 с.
8. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
9. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
10. Левин В. В., Чулков И. В., Тимонин Д. Г., Демидов А. А. Результаты радиационных исследований микросхем энергонезависимой памяти фирмы АТМ-10L // Тр. конф. „Стойкость-2003“. Лыткарино, Московская обл.: НИИП, 2003.
11. Патраев В. Е., Трифанов И. В. Анализ показателей качества и надежности при эксплуатации современных космических аппаратов // Вестн. СибГАУ. 2010. № 2. С. 110—113.
12. Максимов Ю. В., Патраев В. Е., Тололо В. А. Модель надежности космического аппарата // Вестн. СибГАУ. 2005. № 3. С. 144—147.
13. Жаднов В. В., Артюхова М. А. Метод расчетной оценки показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2014. № 2. С. 260—264.
14. Жаднов В. В., Артюхова М. А. Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности // Надежность. 2015. № 1(52). С. 13—18.
15. Артюхова М. А. Влияние низкоинтенсивной радиации на СВЧ-устройства // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2014. № 10. С. 10—12.
16. Жаднов В. В. Прогнозирование показателей надежности КМОП ИС при воздействии ионизирующих излучений космического пространства низкой интенсивности // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2014. № 17. С. 15—21.

17. Акулов О. А., Фролков Е. В., Шатунов А. В. Подход к оценке и прогнозированию состояния бортовых вычислительных систем космических аппаратов наблюдения в процессе их применения на основе результатов натурных экспериментов // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королёва. 2010. № 2. С. 241—247.
18. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М.: Мир, 1967. 752 с.
19. Аронов И. З., Бодин Б. В., Липидус В. А. Надежность и эффективность в технике. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
20. Аронов И. З., Бурдасов Е. И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1987. 184 с.

Сведения об авторах

- Валерий Борисович Рудаков** — д-р техн. наук, профессор; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; главный научный сотрудник; E-mail: baklanov@niiks.com
- Александр Сергеевич Бурцев** — канд. техн. наук; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; 994 подразделение; главный научный сотрудник; E-mail: baklanov@niiks.com
- Павел Альбертович Филоненко** — „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; 994 подразделение; заместитель начальника отдела; E-mail: baklanov@niiks.com
- Виталий Анатольевич Мироничев** — Государственная корпорация по космической деятельности „Роскосмос“, начальник отдела; E-mail: baklanov@niiks.com

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Рудаков В. Б., Бурцев А. С., Филоненко П. А., Мироничев В. А. Математические модели надежности космических аппаратов радиоэлектронной аппаратуры негерметичного исполнения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 566—575.

MATHEMATICAL MODELS OF RELIABILITY OF NON-HERMETIC SPACE APPLIANCES OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

V. B. Rudakov¹, A. S. Burtsev¹, P. A. Filonenko¹, V. A. Mironichev²

¹ A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichiev State Research and Production Space Center JSC, 141091, Moscow Region, Korolev, Russia
E-mail: baklanov@niiks.com

² State Space Corporation ROSCOSMOS, 129110, Moscow, Russia

Ionizing radiation from outer space is reported to be currently the main factor affecting spacecraft reliability. In present, calculations of reliability are carried out without an account for the effect of ionizing radiation because according to normative documents, the influence of ionizing radiation is to be accounted for only in the case of the absence of requirements to electronic products durability. Two mathematical models accounting for the increasing character of elements failure rates under the influence of ionizing radiation as a function of time are proposed. The first of the models allows to evaluate the reliability of equipment with structural diagram containing an unloaded reserve. The use of the second model makes it possible to reduce the volume of spacecraft equipment ground testing using the a priori information on its reliability.

Keywords: reliability, spacecraft, reduced testing, ionized radiation

REFERENCES

1. Patrayev V.E., Trifanov I.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2010, no. 2, pp. 110–113. (in Russ.)
2. Artyukhova M.A. *Nadezhnost' i kachestvo (Reliability and Quality)*, Proceedings of International Symposium, 2013, no. 2, pp. 9–11. (in Russ.)
3. Maksimov I.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2010, no. 4, pp. 100–101 (in Russ.)
4. Men'shikov V.A., Rudakov V.B., Sychev V.N. *Kontrol' kachestva kosmicheskikh apparatov pri otrabotke i proizvodstve. Optimizatsiya i upravleniye riskami (Quality Control of Spacecrafts at Working*

- off and Production. Optimization and Risk Management), Moscow, 2009, 400 p. (in Russ.)
5. Testoyedov N.A., Dvirnyy V.V., Morozov E.A., Dvirnyy G.V., Eremenko N.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2015, no. 2, pp. 430–437. (in Russ.)
 6. Kuznetsov V.A., ed., *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: Spravochnik. T. 10. Spravochnyye dannyye po usloviyam ekspluatatsii i kharakteristikam nadezhnosti* (Reliability and Efficiency in Technology: Reference. Vol. 10. Reference Data on Operating Conditions and Reliability Characteristics), Moscow, 1990, 336 p. (in Russ.)
 7. Messenger G.C., Ash M.S. *Single Event Phenomena*, Springer, Boston, MA, 1997.
 8. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. *Obespecheniye stoykosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniym* (Ensuring Resistance of Communication Equipment to Ionizing and Electromagnetic Radiation), Moscow, 1988, 296 p. (in Russ.)
 9. Chumakov A.I. *Deystviye kosmicheskoy radiatsii na integral'nyye skhemy* (Effect of Space Radiation on Integrated Circuits), Moscow, 2004, 320 p. (in Russ.)
 10. Levin V.V., Chulkov I.V., Timonin D.G., Demidov A.A. *Stoykost'-2003* (Resistance-2003), Proceedings of the Conference, Lytkarino, Moskovsky region, 2003. (in Russ.)
 11. Patrayev V.E., Trifanov I.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2010, no. 2, pp. 110–113. (in Russ.)
 12. Maksimov Yu.V., Patrayev V.E., Tololo V.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2005, no. 3, pp. 144–147. (in Russ.)
 13. Zhadnov V.V., Artyukhova M.A. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of International Symposium, 2014, no. 2, pp. 260–264. (in Russ.)
 14. Zhadnov V.V., Artyukhova M.A. *Dependability*, 2015, no. 1(52), pp. 13–18. (in Russ.)
 15. Artyukhova M.A. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2014, no. 10, pp. 10–12. (in Russ.)
 16. Zhadnov V.V. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh*, 2014, no. 17, pp. 15–21. (in Russ.)
 17. Akulov O.A., Frolkov E.V., Shatunov A.A. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2010, no. 2, pp. 241–247. (in Russ.)
 18. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, Vol. 1, John Wiley & Sons Inc., 1957.
 19. Aronov I.Z., Bodin B.V., Lapidus V.A. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. T. 6. Eksperimental'naya otrabotka i ispytaniya* (Reliability and Efficiency in the Equipment. Vol. 6. Experimental Working off and Tests), Moscow, 1988, 376 p. (in Russ.)
 20. Aronov I.Z., Burdasov E.I. *Otsenka nadezhnosti po rezul'tatam sokrashchennykh ispytaniy* (Reliability Assessment by Results of the Reduced Tests), Moscow, 1987, 184 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-----------------------------|--|
| Valery B. Rudakov | — Dr. Sci, Professor; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Senior Scientist; E-mail: baklanov@niiks.com |
| Alexander S. Burtsev | — PhD; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC, Department 994; Chief Researcher; E-mail: baklanov@niiks.com |
| Pavel A. Filonenko | — A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC, Department 994; Deputy Head of Department; E-mail: baklanov@niiks.com |
| Vitaly A. Mironichev | — State Space Corporation ROSCOSMOS; Head of Department; E-mail: baklanov@niiks.com |

For citation: Rudakov V. B., Burtsev A. S., Filonenko P. A., Mironichev V. A. Mathematical models of reliability of non-hermetic space appliances of radio-electronic equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 566–575 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-566-575