



Жаднов В.В., Артюхова М.А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования показателей надежности современной бортовой аппаратуры космических аппаратов. Показана целесообразность использования результатов испытаний аппаратуры и ее элементов на стойкость к воздействию ионизирующих излучений для прогнозирования показателей надежности. Обоснована возможность применения альфа-распределения времени наработки до отказа для прогнозирования показателей безотказности и долговечности КМОП ИС. Приведены расчетные соотношения для оценки вероятности безотказной работы, среднего времени наработки на отказ и минимальной наработки. Показаны возможные пути повышения стойкости современной бортовой аппаратуры космических аппаратов путем использования специализированных способов защиты от воздействий ионизирующих излучений космического пространства. Данное научное исследование (№14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014 г.

Ключевые слова: надежность, стойкость, радиоэлектронное средство, интегральная микросхема, космический аппарат, ионизирующее излучение.

Практически повсеместное применение в отечественной аппаратуре электронной компонентной базы иностранного производства с одной стороны позволяет проектировать и выпускать аппаратуру, отвечающую современным требованиям, а с другой стороны создает ряд трудностей при ее проектировании, в частности при проектной оценке показателей надежности. Особенно это касается бортовой аппаратуры космических аппаратов, в которой широко применяются полупроводниковые компоненты коммерческого уровня качества, имеющие относительно низкую радиационную стойкость. Поэтому при прогнозировании показателей надежности такой аппаратуры необходимо учитывать и вероятность отказа таких компонентов из-за воздействий ионизирующих излучений космического пространства.

Расчет показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) проводится при ее разработке для подтверждения принципиальной возможности обеспечения требуемого уровня этих показателей и является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных в ГОСТ РВ 20.39.302 [1]. Расчет надежности составных частей аппаратуры (электронных модулей 1-го уровня) должен проводиться по методике, приведенной в ОСТ 4Г 0.012.242 [2], основанной на методе «λ-характеристик», в частности вероятность безотказной работы (P_1) определяется по формуле:

$$P_1(t_{\text{сac}}) = e^{-\Lambda \cdot t_{\text{сac}}},$$

где Λ – эксплуатационная интенсивность отказов;
 $t_{\text{сac}}$ – срок активного существования (САС) КА.

$$\Lambda = \sum_{n=1}^N \lambda_n$$

где λ_n – эксплуатационная интенсивность отказов электрорадиоизделий (ЭРИ); N – количество ЭРИ.

В обеспечение этой методики для расчетов интенсивностей отказов (λ -характеристик) ЭРИ должны использоваться официальные справочники [3, 4], что обеспечивает выполнение требования ГОСТ 27.301 [5] в части воспроизводимости результатов расчетов.

При использовании указанных выше стандартов для учета особенностей бортовой аппаратуры космических аппаратов в математические модели λ_n введены два коэффициента:

K_3 – коэффициент эксплуатации, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации на борту КА;

$K_{\text{ИИ}}$ – коэффициент влияния ионизирующих излучений (ИИ), учитывающий степень жесткости внешних ИИ.

Вместе с тем, в РД 134-0139 [6] вскользь указывается, что если в техническом задании требования по радиационной стойкости не заданы, то для расчета вероятности безотказной работы аппаратуры следует использовать соотношение:

$$P(t_{\text{сac}}) = P_1(t_{\text{сac}}) \cdot P_2(t_{\text{сac}}) \cdot P_3,$$

где $P_2(t_{\text{сac}})$ – вероятность безотказной работы при воздействии ИИ КП низкой интенсивности (дозовые эффекты); P_3 – вероятность безотказной работы при проникновении одиночной заряженной частицы с высокой энергией (одиночные эффекты).

Методики расчета P_3 приведены в РД 134-0139 [6] и в данном исследовании рассматриваться не будут.

Расчет $P_2(t_{\text{сac}})$ по методикам ОСТ 134-1034 [7] проводится «поэлементным» методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭРИ (предельно-допустимой дозы – $D_{\text{пнд}}$), приведенного в нормативно-технической документации (НТД) с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем $D_{\text{нд}}(t_{\text{сac}})$. Уровень радиационных воздействий на ЭРИ зависит как от характеристик орбиты КА, так и от мест их размещения на борту КА, классификация которых приведена в ГОСТ РВ 20.39.305 [8].

Для КА с длительными САС, эксплуатирующихся на геостационарных орбитах, принято считать, что облучение ЭРИ идет с постоянной интенсивностью, т.е. процесс накопления дозы можно аппроксимировать линейной функцией вида:

$$D_{\text{нд}}(t) = D_{\text{пд}} \cdot t, \quad (1)$$

где $D_{\text{нд}}(t)$ – поглощенная доза ЭРИ; $D_{\text{пд}}$ – мощность поглощенной дозы ЭРИ в единицу времени; t – время.

Результатом оценки является коэффициент запаса ЭРИ по радиационной стойкости (K_3). Если $K_3 \geq 3$, то $P_2(t_{\text{сac}}) = 1$, если $K_3 \leq 1$, то $P_2(t_{\text{сac}}) = 0$, если же $1 < K_3 < 3$, то для оценки значения $P_2(t_{\text{сac}})$ необходимо проведение испытаний ЭРИ на стойкость, причем сначала следует провести испытания до расчетного уровня дозы, равного $D_{\text{нд}}(t_{\text{сac}})$, а затем, желательно, до отказа, что позволит уточнить значение уровня стойкости данного типа ЭРИ.

Из вышеизложенного очевидно, что методика ОСТ 134-1034 [7] ориентирована на применение в аппаратуре КА радиационно-стойких ЭРИ, а применение ЭРИ с $K_3 < 3$ и их испытания должны проводиться в исключительных случаях. Однако применение в отечественных КА аппаратуры, в которой широко используется электронная компонентная база (ЭКБ) иностранного производства (ИП), значительную часть которой составляют КМОП ИС «коммерческого» уровня качества с низкой стойкостью к воздействию ИИ КП, уже привело к тому, что испытания таких ИС стали не исключением, а правилом. Причем эти испытания проводятся именно до отказа, т.к. в НТД (Data Sheet) данных по радиационной стойкости не приводится, а если и приводятся, то они крайне скудные [9].

Значение $P_2(t_{\text{сac}})$ по результатам испытаний определяется как:

$$P_2(t_{\text{сac}}) \approx 1 - Q^*$$

где Q^* – частота отказов ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

$$Q = \frac{k(D_{\text{нд}})}{K}, \quad (2)$$

где $k(D_{\text{нд}})$ – число отказавших ИС, у которых $D_{\text{пнд}} \leq D_{\text{нд}}(t_{\text{сac}})$; K – общее число ИС, поставленных на испытания.

Принимая во внимание, что на рынке ЭКБ представлен широкий выбор сходных по функциональному назначению и характеристикам КМОП ИС различных производителей, очевидно, что одним из главных критериев при выборе конкретных типов ИС должны быть их показатели надежности и стойкости, что выдвигает еще одну задачу – оценку их показателей надежности при воздействии ИИ низкой интенсивности на ранних этапах проектирования.

Применение для ее решения методик ОСТ 134-1034 [7] естественно возможно, но вряд ли экономически оправдано, т.к. результаты испытаний не всегда дают положительный результат. В тоже время, на ранних этапах проектирования аппаратуры КА, где определяется номенклатура ЭКБ, при выборе типономиналов ИС должна быть уверенность в возможности положительных результатов их сертификационных испытаний.

Одним из возможных путей решения этой задачи является использование результатов уже проведенных испытаний ИС ИП на радиационную стойкость для

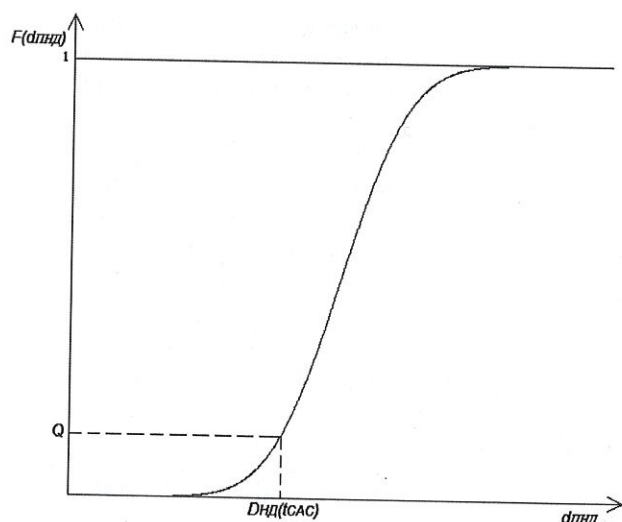


Рис. 1. Функция распределения предельной накопленной дозы

прогнозирование показателей надежности сходных по функциональному назначению и конструктивно-технологическому исполнению КМОП ИС, относящихся к одной технологической группе.

Так, результаты испытаний КМОП ИС ПЗУ с топологической нормой 0,15 мкм производства компаний Xilinx, Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Atmel, Analog Devices и др. показали, что для $d_{ПНД}$ можно принять усеченное нормальное распределение:

$$f(d_{ПНД}) = \frac{C}{\sigma(d_{ПНД}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[d_{ПНД} - m(d_{ПНД})]^2}{2 \cdot \sigma^2(d_{ПНД})}}, \quad (3)$$

где $f(d_{ПНД})$ – плотность вероятности; $m(d_{ПНД})$ – математическое ожидание; $\sigma(d_{ПНД})$ – среднее квадратичное отклонение; C – нормирующий множитель.

Значение C определяется по формуле:

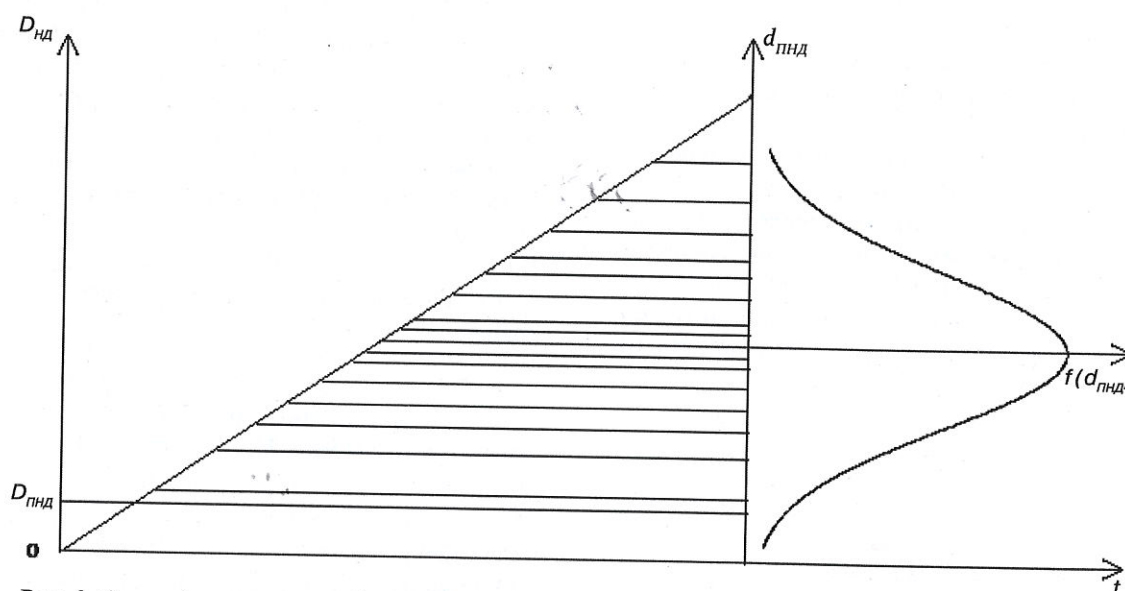


Рис. 2. Схема формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний

$$C = \frac{1}{F(D_{ПНД_{\max}}) - F(D_{ПНД_{\min}})},$$

где $F(D_{ПНД_{\max}})$, $F(D_{ПНД_{\min}})$ – значения функции нормального распределения.

Здесь следует отметить, что использование модели (3) позволяет также рассчитать оценку $P_2(t_{сac})$ ИС при известных $m(d_{ПНД})$, $\sigma(d_{ПНД})$ и $D_{НД}(t_{сac})$:

$$P_2(t_{сac}) = 1 - F[D_{НД}(t_{сac})] = 1 - \int_{D_{ПНД_{\min}}}^{D_{НД}(t_{сac})} f(d_{ПНД}) d_{ПНД}, \quad (4)$$

где $F(d_{ПНД})$ – значение функции нормального распределения при $d_{ПНД} = D_{НД}(t_{сac})$.

Типовой вид функции $F(d_{ПНД})$ приведен на рис. 1.

На рис. 2 показана схема формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний.

Следует отметить, что использование такой схемы формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний также позволяет уточнить значение $\sigma(d_{ПНД})$ для конкретного типоминнала ИС данной технологической группы, если для нее известна $D_{ПНД}$. Как правило, $D_{ПНД}$ представляет собой нижнюю «3 σ -границу» (см. рис. 2). Тогда, в предположении постоянства $m(d_{ПНД})$ и коэффициента вариации (v), значение σ можно получить из уравнения:

$$D_{ПНД}^* = \frac{\sigma(d_{ПНД}^*)}{v} - 3 \cdot \sigma(d_{ПНД}^*),$$

где $D_{ПНД}^*$ – предельно-допустимая доза данного типоминнала ИС; $v = \sigma(d_{ПНД})/m(d_{ПНД})$; $\sigma(d_{ПНД}^*)$ – среднее квадратичное отклонение $d_{ПНД}^*$ данного типоминнала ИС.

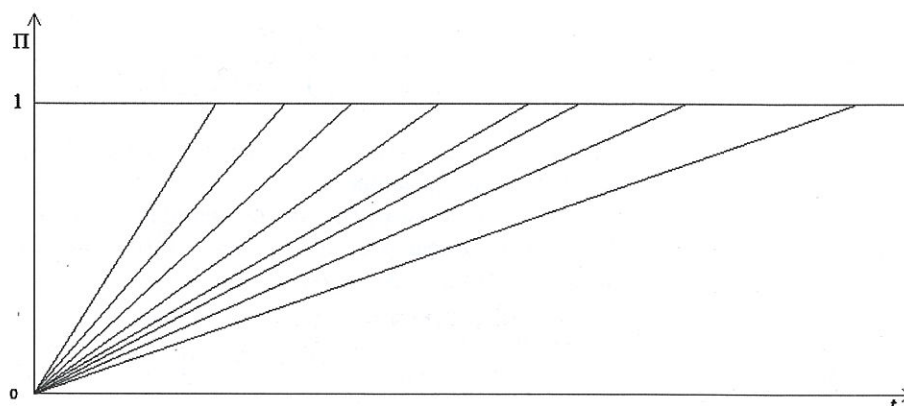


Рис. 3. Реализации процесса изменения $D_{ндк}(t_i)/d_{пндк}$ ИС

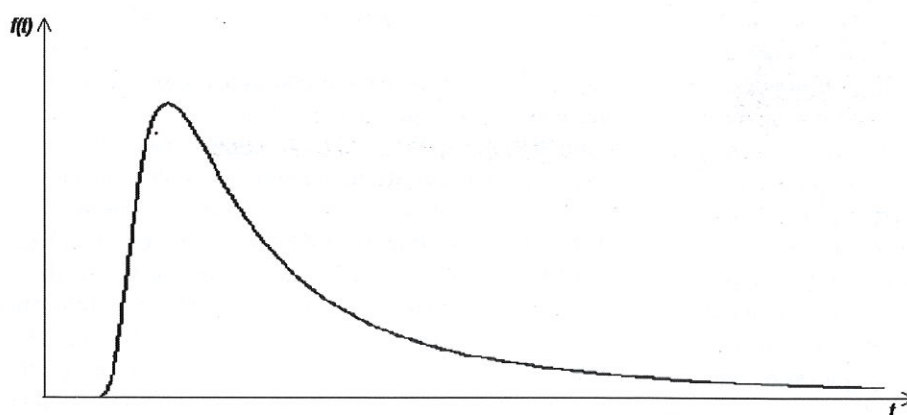


Рис. 4. Плотность вероятности наработки до отказа ИС

Как видно из рис. 2 испытания проводятся при $D_{пнд} = \text{const}$ в течении времени $t_{и}$. Однако, исходя из (1) можно найти такие значения $D_{пндк}$ для каждой (k-ой) ИС, при которых их отказы будут происходить при одном и том же значении $D_{пндк}/d_{пндк} = 1$:

$$D_{пндк} = \frac{d_{пндк}}{t_{ок}}, \quad (5)$$

где $d_{пндк}$ – предельно-допустимая доза k-ой ИС; $t_{ок}$ – время до отказа k-ой ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

На рис. 3 показаны полученные с использованием (5) временные зависимости $D_{ндк}(t_i)/d_{пндк}$ ИС.

Как видно из рис. 3, процесс изменения $D_{ндк}(t_i)/d_{пндк}$ представляет собой случайный процесса «веерного» типа по классификации ГОСТ 27.005 [10]. Исходя из этого и в соответствии с рекомендациями ГОСТ 27.005 [10] в качестве модели отказов следует принять α -распределение вида:

$$f(t) = \frac{C \cdot \beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2}, \quad (6)$$

где α, β – параметры распределения.
Параметр α – это относительная скорость изменения

определяющего параметра (коэффициент однородности скорости изменения определяющего параметра).

Параметр β – это относительный запас долговечности.

График функции плотности вероятности α -распределения показана на рис. 4.

Значения параметров α и β можно определить по соотношениям, приведенным ГОСТ 27.005 [10]:

$$\alpha = \frac{m(V_{п})}{\sigma(V_{п})}; \quad \beta = \frac{P_{пр} \cdot t_{сас}}{\sigma(V_{п})}$$

где $m(V_{п})$ – средняя скорость изменения определяющего параметра; $\sigma(V_{п})$ – среднеквадратичное отклонение скорости изменения определяющего параметра; $P_{пр}$ – предельное значение определяющего параметра.

Значения $m(V_{п})$, $\sigma(V_{п})$ и $\sigma(V_{п})$ можно определить по известным значениям $m(d_{пнд})$, $\sigma(d_{пнд})$ и $D_{нд}(t_{сас})$. Однако, при этом следует учитывать следующие особенности. Дело в том, что

в отличие от «классической» схемы формирования модели α -распределения, где предельное значение определяющего параметра $P_{оп}$ является детерминированной величиной, а скорость его изменения – случайной (см. рис. 2), в данном случае скорость накопления дозы ($D_{нд}$), в соответствии с (1), является детерминированной величиной, а предельно-допустимая накопленная доза ($d_{пнд}$) – случайной (см. рис. 1). А это приводит к тому, что если в качестве предельного значения определяющего параметра принять $D_{нд}(t_{сас})$ (детерминированную величину), то при ее увеличении $P_2(t_{сас})$ так же будет возрастать, что противоречит здравому смыслу (т.е., чем больше будет доза, накопленная за время $t_{сас}$, тем меньше будет вероятность отказов ИС за то же время).

Поэтому, чтобы избежать этого противоречия, следует принять:

$$m(V_{оп}) = D_{нд} \quad \text{и} \quad P_{оп} = m(d_{пнд}).$$

Тогда значения параметров α и β будут соответственно равны:

$$\alpha = \frac{D_{нд}}{\sigma(d_{пнд})}; \quad \beta = \frac{m(d_{пнд}) \cdot t_{сас}}{\sigma(d_{пнд})}. \quad (7)$$

Рис. 5 иллюстрирует адекватность приведенного выше обоснования.

Как видно из рис. 5 вероятности (заштрихованные

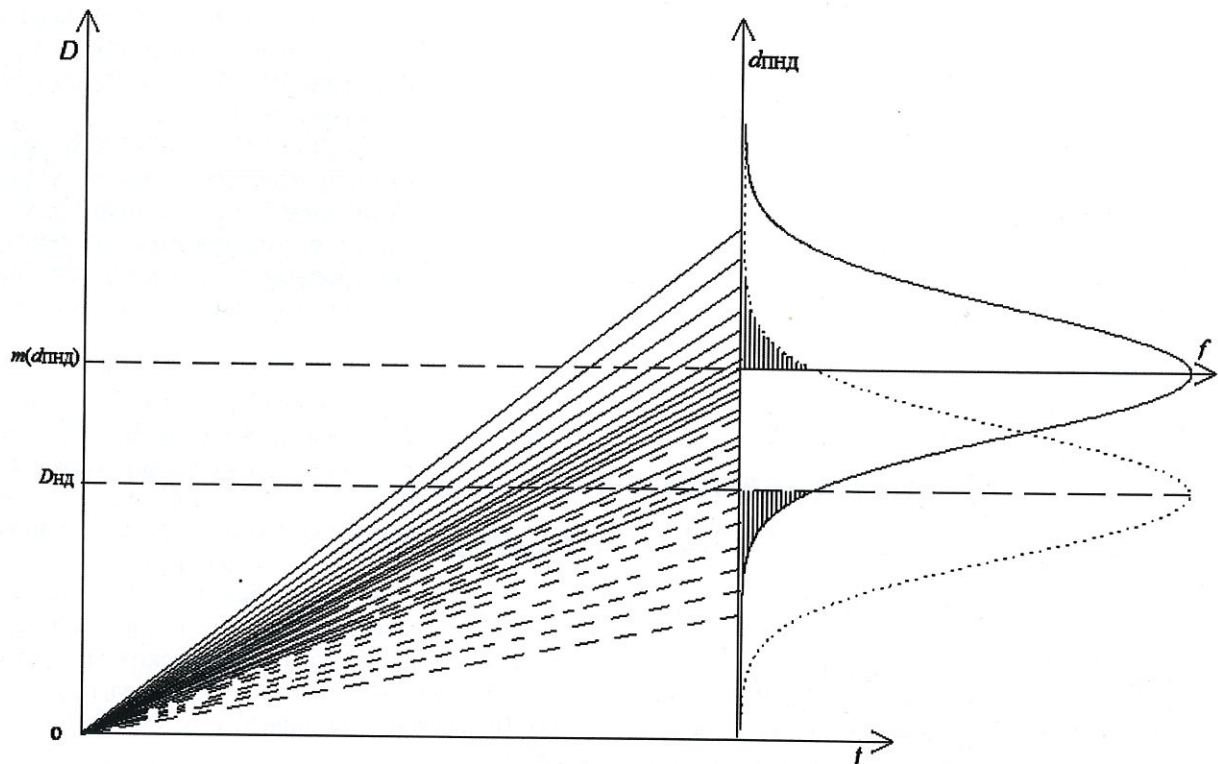


Рис. 5. Плотности вероятности отказов ИС при $m(V_{оп}) = m(d_{Пнд})$ и $m(V_{оп}) = D_{нд}$

области) отказа при $\Pi_{оп} = D_{нд}$ и безотказной работы при $\Pi_{оп} = m(d_{Пнд})$ равны.

При использовании модели (5) расчет $P_2(t_{сac})$ ИС при известных α , β и C проводится по формуле:

$$P_2(t_{сac}) = 1 - \int_0^{t_{сac}} f(t) dt.$$

Кроме того, следует отметить, что использование модели отказов (5) позволяет, в отличие от (4), получить оценку не только $P_2(t_{сac})$, но и оценку среднего времени наработки до отказа (T_0) ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P_2(t) dt.$$

Еще одним важным аспектом применения модели (5) является возможность оценки такого показателя долговечности ИС, как минимальная наработка ($T_{м.н}$). Это является особенно важным, так как при оценке этого показателя КМОП ИС в инженерной практике допускаются методическая погрешность, причины которой подробно рассмотрены в [11, 12]. Заметим только, что в соответствии ГОСТ РВ 20.39.303 [13] КМОП ИС относятся к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Критерием предельного состояния таких

изделий является максимально-допустимое значение интенсивности отказов ($\lambda_{эmax}$).

При использовании модели (5) значение $T_{м.н2}$ КМОП ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности равно времени эксплуатации (t) аппаратуры КА, при котором плотность распределения $f(t) \approx \lambda(t)$ впервые достигает критического значения $f_{кр}(t = T_{м.н2}) \approx \lambda_{max}$ [14]. Значение λ_{max} можно определить исходя из требуемого значения $\lambda_{эmax}$ КМОП ИС. На рис. 6 показана связь между значениями λ_{max} и $T_{м.н2}$.

Тогда значение $T_{м.н}$ можно найти из уравнения:

$$\lambda_{MAX} = \frac{\beta}{(T_{м.н2})^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{(\frac{\beta}{T_{м.н2}} - \alpha)^2}{2}},$$

разрешив его относительно $T_{м.н2}$.

Заметим, что точное значение $T_{м.н2}$ можно получить при $\lambda_{кр}(t = T_{м.н2}) = \lambda_{max}$, разрешив уравнение (8) относительно $T_{м.н2}$:

$$\lambda_{MAX} = \lambda_{кр} = \frac{f(T_{м.н2})}{1 - F(T_{м.н2})}, \quad (8)$$

где $F(T_{м.н2})$ – значение функции распределения наработки.

Итоговое значение минимальной наработки КМОП ИС получают на основе соотношения ОСТ 4.012.013 [16]:

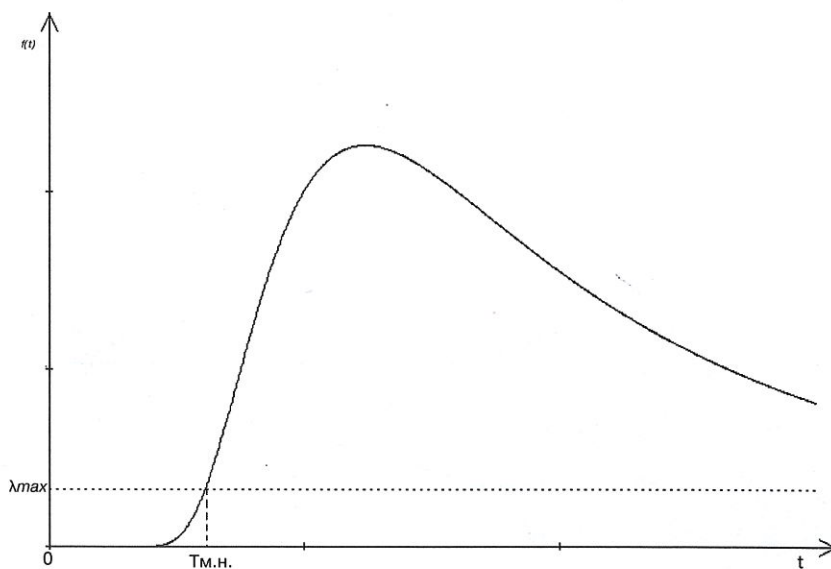


Рис. 6. Связь значений $\lambda_{\max}$ и $T_{M.H.2}$

$$T_{M.H.ис} = \min(T_{M.H.1}, T_{M.H.2}),$$

где $T_{M.H.1}$ – минимальная наработка КМОП ИС при отсутствии воздействия ИИ низкой интенсивности.

Представленный в настоящем исследовании материал позволяет получить прогнозную оценку показателей надежности и долговечности бортовой аппаратуры космических аппаратов. Однако, значение уровня стойкости и надежности КМОП ИС зависит не только от характеристик закона распределения их предельно-допустимой дозы, но и от величины накопленной дозы. Поэтому, если прогнозная оценка показателей надежности не удовлетворяет требованиям, единственным способом обеспечения требуемых значений показателей надежности и долговечности является снижение величины накопленной дозы. Это может быть достигнуто не только с помощью традиционных средств защиты аппаратуры, как правило, ухудшающих ее массогабаритные характеристики, но и путем применения специализированных способов (например, использования специальных печатных плат [16]), а также рациональным размещением радиационно-стойких ЭРИ на печатных узлах (ПУ) и компоновкой этих ПУ в блоках [17, 18].

Литература

1. ГОСТ РВ 20.39.302-98 КСОТТ. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений.
2. ОСТ 4Г 0.012.242-84 Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.
3. Справочник «Надежность ЭРИ».
4. Справочник «Надежность ЭРИ ИП».
5. ГОСТ 27.301-95 Расчет надежности. Основные положения.

6. РД 134-0139-2005 Методы испытаний и оценки стойкости РЭА КА к воздействию ЗЧ КП по одиночным сбоям и отказам.

7. ГОСТ 134-1034-2012 Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

8. ГОСТ РВ 20.39.305-98 КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к воздействию поражающих факторов ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства.

9. **Артюхова М.А.** Проблемы обеспечения стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах проектирования. / М.А. Артюхова, В.В. Жаднов, С.Н. Полесский. // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9. – с. 93-98.

10. ГОСТ 27.005-97 Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.

11. **Жаднов В.В.** Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / В.В. Жаднов. // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – с. 65-73.

12. **Жаднов В.В.** Повышение точности расчётной оценки показателей долговечности бортовой космической аппаратуры. / В.В. Жаднов. // Радиовысотометрия-2013: Сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. / Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2013. – с. 164-169.

13. ГОСТ РВ 20.39.303-98 КСОТТ. Требования к надежности. Состав и порядок задания.

14. **Дружинин Г.В.** Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Г.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.

15. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.

Двусторонняя печатная плата. Жаднов В.В. Патент на полезную модель RU 135219 27.11.2013.

16. **Артюхова М.** Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры. / М. Артюхова, В. Жаднов, С. Полесский. – Электронные компоненты. – 2013. – № 1. – с. 72-76.

17. **Жаднов В.В.** Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учеб. пособие. / В.В. Жаднов, Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.