

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ СБОЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СПЛОШНОЙ ЗАЩИТОЙ В ФОРМЕ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

**A MODEL FOR CALCULATING THE FAILURE RATE OF RADIO ELECTRONIC
EQUIPMENT ELEMENTS BEHIND A CONTINUOUS PROTECTION IN THE FORM OF A
PARALLELEPIPED**

Панюшкин А.Н., инженер II-й категории,
Научное конструкторско-технологическое
бюро «ФЕРРИТ», Воронеж, Россия

Panyushkin A.N., Engineer of the II-th
graduate-category, Scientific constructional-
technological burro "FERRIT", Voronezh,
Russia

Панюшкин Н.Н., доктор технических наук,
доцент, профессор, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Panyushkin N.N., DrSc in Technical Sciences,
Docent, Professor, Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Бирюкова И.П., кандидат педагогических
наук, доцент, доцент, ФГКВУ ВО Военный
учебно-научный центр Военно-воздушных
сил «Военно-воздушная академия им.
профессора Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Biryukova I.P., PhD in pedagogical sciences,
Docent, Associate professor, Military
Educational and Scientific Center of the Air
Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air
Force Academy», Voronezh, Russia

Аннотация. Разработана математическая модель для расчета частоты одиночных сбоев в радиоэлектронной аппаратуре в условиях действия ионизирующих излучений космического пространства для орбиты с высотой около 400 километров от поверхности Земли. Модель позволяет проводить анализ зависимости частоты сбоев от габаритных и массовых характеристик сплошных радиационных защит в форме прямоугольного параллелепипеда.

Ключевые слова: радиационная защита, ионизирующее излучение, тяжелые заряженные частицы, высокоэнергетические протоны, частота сбоев, математическая модель.

Abstract. A mathematical model has been developed for calculating the frequency of single failures in electronic equipment under conditions of ionizing radiation in outer space for an orbit with an altitude of about 400 kilometers from the Earth's surface. The model allows for an analysis of the dependence of the frequency of failures on the overall and mass characteristics of solid radiation shields in the form of a rectangular parallelepiped.

Key words: radiation protection, ionizing radiation, heavy charged particles, high-energy protons, failure rate, mathematical model.

Проектирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического применения требует от разработчиков выполнения требований по радиационной стойкости (РС), в

частности требований по сбое- отказоустойчивости. Методика определения показателей РС основана на теоретико-экспериментальном методе с применением аппроксимаций Вейбуллы для частоты сбоев в условиях воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) солнечного и галактического излучения и аппроксимации Бендела для высокоэнергетичных протонов (ВЭП) [1]:

$$\nu_{PЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭРИi} \left(\int_{L_0}^{L_{MAX}} \sigma_i(L) \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_0}^{E_{MAX}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right), \quad (1)$$

где $\nu_{PЭА}$ – частота сбоев в РЭА, в целом, 1/с;

$\varphi_{ТЗЧ}(L)$ – дифференциальный спектр линейных потерь энергии (ЛПЭ) плотности потока ТЗЧ, част·см⁻²·с⁻¹·МэВ⁻¹·см⁻²·мг;

$\varphi_p(E)$ – дифференциальный энергетический спектр плотности потока ВЭП, част·см⁻²·с⁻¹·МэВ⁻¹;

L_0 – пороговая величина ЛПЭ, МэВ·см²·мг⁻¹;

E_0 – пороговая величина энергии ВЭП, МэВ;

L_{MAX} – предельное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ, МэВ·см²·мг⁻¹;

E_{MAX} – предельное значение энергии в спектре ВЭП, МэВ;

$\sigma_i(L)$, $\sigma_i(E)$ – сечения сбоев или одиночных отказов для i-ой группы типономиналов ЭРИ с одинаковыми значениями $\sigma_i(L)$ и $\sigma_i(E)$ в зависимости от ЛПЭ или энергии ВЭП, соответственно, см²;

$n_{ЭРИi}$ – количество ЭРИ в i-ой группе типономиналов с одинаковыми значениями сечений $\sigma_i(L)$ или $\sigma_i(E)$ в РЭА;

n – количество групп типономиналов, отличающихся значениями сечений $\sigma_i(L)$ или $\sigma_i(E)$ в данной РЭА.

Частота сбоев $\nu_{PЭА}$ вычисляется отдельно для каждого вида ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП) солнечного космического излучения (СКЛ), галактического космического излучения (ГКЛ) и естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ). Полная частота отказов ν равна сумме частот от каждого вида ИИ. Вероятность отказов P за определённый промежуток времени t рассчитывают по формуле:

$$P = 1 - e^{-\nu t}.$$

В выражении (1) дифференциальные спектры ЛПЭ и ВЭП зависят от массовой толщины защиты, которая определяется произведением плотности материала ρ на толщину барьера защиты Δ :

$$\delta = \rho \cdot \Delta. \quad (2)$$

Реальная толщина барьера плоской защиты зависит от угла падения частиц ИИ на его кромку [2], поэтому $\varphi_{ТЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ будут зависеть от её геометрических размеров.

Эффективная массовая толщина барьера защиты превышает её реальную толщину [2]:

$$\delta_{EFF} = k_{EFF} \cdot \delta, \quad (3)$$

где k_{EFF} – безразмерный коэффициент, определяемый выражениями [2]:

$$k_{EFF} = \frac{l_0^2}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{\alpha_{MAX}} \int_0^{\beta_{MAX}} \frac{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} d\alpha d\beta; \quad (4)$$

$$\alpha_{MAX} = \arctg\left(\frac{x_{MAX}}{l_0}\right); \quad \beta_{MAX} = \arctg\left(\frac{y_{MAX}}{l_0}\right), \quad (5)$$

где l_0 – наименьшее расстояние (перпендикуляр) от стягивающей поверхности до расчетной точки; x_{MAX} , y_{MAX} – половинные размеры поверхности плоского барьера по осям ox и oy , соответственно.

Известные экспериментальные зависимости $\varphi_{TЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ от массовой толщины сплошной сферической защиты (~ 400 км от поверхности Земли) [3] позволяют использовать для их аппроксимации экспоненциальную функцию в виде:

$$\varphi_j(\delta) = a_j \cdot e^{b_j \cdot \delta} + c_j, \quad (6)$$

где a_j , b_j , $\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$; c_j – размерные константы аппроксимации для j -го вида ИИ, размерность a_j и c_j совпадают с размерностями $\varphi_{TЗЧ}(L)$ или $\varphi_p(E)$.

Заметим, что для плоской защиты плотность потока дополнительно определяется размером телесного угла Ω , который меньше, чем для сплошной сферы ($\Omega_{SPF} = 4\pi$). Поэтому $\varphi_{TЗЧ}(L)$ и $\varphi_p(E)$ должны быть умножены на отношение $\omega = \Omega/\Omega_{SPF}$. Выражение для ω получено в виде:

$$\omega = \frac{(\cos \alpha_{MIN} - \cos \alpha_{MAX})(\beta_{MAX} - \beta_{MIN})}{\pi}. \quad (7)$$

Для случая плоской ограниченной защиты $\cos \alpha_{MIN} = 1$, $\beta_{MIN} = 0$.

Принимая во внимание формулы (2) – (7), получим выражение для частоты сбоев в РЭА при использовании сплошных защит в форме прямоугольных параллелепипедов в зависимости от их габаритно-массовых характеристик:

$$\nu_{PЭА} = \sum_{i=1}^n n_{ЭПИ} \left(6\omega \left(\varphi_{TЗЧ}(\delta_{EFF}) \int_{L_0}^{L_{MAX}} \sigma_i(L) \varphi_{TЗЧ}(L) dL + \varphi_p(\delta_{EFF}) \int_{E_0}^{E_{MAX}} \sigma_i(E) \varphi_p(E) dE \right) \right). \quad (8)$$

В формуле (8) учтено, что для сплошной защиты в форме прямоугольного параллелепипеда количество граней (плоских защит) равно 6.

Таким образом, в работе получена математическая модель для расчета частоты одиночных сбоев в РЭА в условиях действия ИИ КП. Полученная модель позволяет проводить анализ зависимости частоты сбоев от габаритных и массовых характеристик сплошных радиационных защит в форме прямоугольного параллелепипеда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 134-0139-2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценка стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по перемежающимся и катастрофическим отказам. – Москва: ЦНИИмаш, 2005.

2. Панюшкин, А.Н. Модель локальной дозовой нагрузки сплошной защиты с плоскими ограничивающими поверхностями / А.Н. Панюшкин, Н.Н. Панюшкин, И.П. Бирюкова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – №3. – С. 11-16.

3. SSP 50094 Revision B June 2016 NASA/RSA Joint Specifications/Standards Document for the ISS Russian Segment, Houston, Texas. – 494 p. – URL: https://imlive.s3.amazonaws.com/Federal%20Government/ID42272755263273611130549092035837226177/SSP_50094-RevB.pdf.

REFERENCES

1. RD 134-0139-2005. Spacecraft hardware, instruments, devices and equipment. Test methods and resistance assessment to space charged particles for intermittent and catastrophic failures. - Moscow: TsNIIMash, 2005.

2. Panyushkin, A.N. Model of local dose load of continuous protection with flat bounding surfaces / A.N. Panyushkin, N.N. Panyushkin, I.P. Biryukova // Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on radioelectronic equipment. - 2021. - No. 3. - P. 11-16.

3. SSP 50094 Revision B June 2016 NASA/RSA Joint Specifications/Standards Document for the ISS Russian Segment, Houston, Texas. – 494 p. – URL: https://imlive.s3.amazonaws.com/Federal%20Government/ID42272755263273611130549092035837226177/SSP_50094-RevB.pdf.