

Влияние низкоинтенсивной радиации на СВЧ-устройства

Радиоэлектронная аппаратура космических аппаратов (РЭА КА) при эксплуатации подвергается воздействию ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП), что является дополнительной причиной отказов. На настоящий момент принято разделять надежность РЭА и ее радиационную стойкость, не смотря на то, что эти явления взаимосвязаны. Целью статьи является оценка влияния ИИ КП на показатели надежности СВЧ-устройств, а именно на вероятность безотказной работы, на примере СВЧ-усилителя. Модель вероятности отказа устройства $Q(t_{CAC})$ за срок активного существования (САС) строится как произведение вероятностей отказа $Q_1(t_{CAC})$ - вероятность отказа устройства вследствие набора предельно допустимой дозы, $Q_2(t_{CAC})$ - вероятность отказа устройства при отсутствии воздействия ИИ КП, $Q_3(t_{CAC})$ - вероятность возникновения одиночного эффекта. Вероятности $Q_1(t_{CAC})$ и $Q_3(t_{CAC})$ оцениваются по действующим нормативным документам. Вероятность $Q_1(t_{CAC})$ рассчитывается на основе вероятностно-физических моделей. Исследование показывает, что, не смотря на высокие показатели радиационной стойкости применяемых в РЭА КА СВЧ устройств, при требуемых длительных САС низкоинтенсивная радиация будет оказывать ощутимое влияние на вероятность безотказной работы, что следует учитывать при разработке аппаратуры.

Ключевые слова: надежность, радиационная стойкость, СВЧ-устройства, ионизирующее излучение, вероятность безотказной работы, космические аппараты.

Данное научное исследование (номер проекта 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы "Научный фонд НИУ ВШЭ" в 2014 г.

Артюхова М.А.,
НИУ ВШЭ МИЭМ, artuhova@hse.ru

В составе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) широко применяются устройства сверхвысоких частот (СВЧ). Для примера, рассмотрим контейнер радиоканала КА «Ресурс-ДК», запущенного в эксплуатацию в 2006 году. Контейнер радиоканала включает в себя: коммутатор бортовой сети, управляющий вычислительный комплекс, радиопередающее устройство, формирователь кадра, блок управления антенной. В состав радиопередающего устройства входит ряд СВЧ-устройств – аттенуаторы СВЧ с аналоговым управлением, усилители СВЧ, двойные балансные смесители СВЧ, детекторные диоды СВЧ. На примере усилителей СВЧ покажем влияние низкоинтенсивной радиации на надежность устройства.

Потоки частиц низких энергий (до 1 МэВ) приводят к параметрическим и функциональным отказам РЭА (постепенным отказам) [1-3]. Потоки частиц более высоких энергий приводят к одиночным эффектам – обратимым и катастрофическим отказам (внезапным отказам).

Срок активного существования (САС) РЭА в основном определяется радиационной стойкостью аппаратуры и вероятностью ее безотказной работы. В условиях космоса накопленная (поглощенная) доза радиации измеряется в раддах. Существуют методы, позволяющие рассчитать величины накопленной дозы в заданной точке с учетом экранов и автоматизированные программные средства, позволяющие строить радиационные поля на основе данных о конструкции [4]. Объектом исследования является мощный СВЧ-усилитель EMP108-P1 производства фирмы *Excelics Semiconductor*, уровня качества *Military*, данные о параметрах приведены на рис. 1. Целью исследования является оценить возможность его применения в составе РЭА КА с САС 25 лет.

Вероятность отказа СВЧ-усилителя рассчитывается по формуле: $Q(t_{CAC}) = Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3$, где: $Q(t_{CAC})$ – вероятность отказа усилителя; Q_1 – вероятность отказа усилителя в результате накопления предельного уровня дозы; Q_2 – вероят-

ность отказа усилителя при отсутствии воздействия ионизирующего облучения; Q_3 – вероятность отказа из-за воздействия отдельных ядерных частиц; t_{CAC} – срок активного существования.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_a = 25 °C, 50 ohm, VDD = 7 V, IDQ = 200 mA)

SYMBOL	PARAMETER/TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
F	Operating Frequency Range	7.0		9.5	GHz
P1dB	Output Power at 1dB Gain Compression	22.5	24.0		dBm
Gss	Small Signal Gain	16.0	19.0		dB
OIMD3	Output 3 rd Order Intermodulation Distortion @Δf=10MHz, Each Tone Pout 14dBm		-40		dBc
Input RL	Input Return Loss		-12		dB
Output RL	Output Return Loss		-6		dB
Idss	Saturate Drain Current V _{DS} =3V, V _{GS} =0V	244	305	366	mA
VDD	Power Supply Voltage		7	8	V
Rth	Thermal Resistance (Au-Sn Eutectic Attach)		30		°C/W
Tb	Operating Base Plate Temperature	-35		+85	°C

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS FOR CONTINUOUS OPERATION^{1,2}

SYMBOL	CHARACTERISTIC	VALUE
V _{DS}	Drain to Source Voltage	8 V
V _{GS}	Gate to Source Voltage	-4 V
I _{DP}	Drain Current	Idss
I _{GSF}	Forward Gate Current	4.5 mA
P _{IN}	Input Power	@ 3dB compression
T _{CH}	Channel Temperature	150°C
T _{STG}	Storage Temperature	-65/150°C
P _T	Total Power Dissipation	3.8W

1. Operating the device beyond any of the above rating may result in permanent damage.
2. Bias conditions must also satisfy the following equation $V_{DS} \cdot I_{DS} < (T_{CH} - T_{amb}) / R_{th}$, where T_{amb} = ambient temperature

Рис. 1. Параметры мощного СВЧ усилителя EMP108-P1

Вероятность отказа Q_2 оценивается по формуле:

$$Q_2 = 1 - e^{-\lambda_{надеж} \cdot t_{CAC}}$$

где: $\lambda_{надеж}$ – интенсивность отказов при отсутствие воздействия радиации; t_{CAC} – срок активного существования.

Интенсивность отказов $\lambda_{надеж}$ электрорадиоизделий иностранного производства оценивается по справочнику [5]. Согласно [5], интенсивность отказов для микросхемы *GaAs* СВЧ рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda_{надеж} = (\lambda_{кр} \cdot K_T \cdot K_\phi + \lambda_{кор} \cdot K_\gamma) \cdot K_\Pi,$$

где: $\lambda_{кр}$ – интенсивность отказов кристалла; $\lambda_{кор}$ – интенсивность отказов корпуса; K_T – коэффициент, учитывающий

изменение интенсивности отказов в зависимости от температуры окружающей среды; K_{ϕ} – коэффициент функционального назначения; K_3 – коэффициент эксплуатации; K_{π} – коэффициент приемки.

Коэффициент K_T описывается следующим выражением:

$$K_T = 0,1 \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{8,617 \cdot 10^{-5}} \cdot \left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{423} \right) \right)},$$

где: T_j – температура кристалла, рассчитывается из данных спецификации на изделие (см. рис.1).

Отсюда, $\lambda_{надеж} = 1,05 \cdot 10^{-6}$, отказов/час.

Вероятность отказа усилителя из-за воздействия отдельных ядерных частиц оценивается по формуле, приведенной в стандарте [6]:

$$Q_3 = 1 - \exp(-v \cdot t_{раб}),$$

где: v – частота возникновения возможных отказов в усилителе под действием отдельных ядерных частиц; $t_{раб}$ – время, в течение которого усилитель находится во включенном состоянии при установленном САС.

Частота возникновения возможных катастрофических отказов определяется следующим выражением:

$$v = \int_{L_0}^{L_{max}} \sigma(L) \cdot \varphi_{ТЗЧ}(L) dL + \int_{E_0}^{E_{max}} \sigma(E) \cdot \varphi_p(E) dE,$$

где: $\sigma(L)$, $\sigma(E)$ – зависимости сечений возникновения одиночных отказов от линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц (ЛПЭ ТЗЧ) и энергии протонов, соответственно.

Согласно испытаниям, в ЭРИ, выполненных по биполярной технологии, тиристорные эффекты и катастрофические отказы при воздействии фактора с характеристикой 7.K11(7.K11) (эквивалентно воздействию ТЗЧ) не проявляются. То есть, частоту возникновения возможных катастрофических отказов из-за воздействия ТЗЧ и протонов КП можно принять $v=0$.

Для того, чтобы оценить вероятность возникновения отказа усилителя СВЧ из-за накопления им предельного уровня дозы, используем данные проведенных ранее испытаний на радиационную стойкость. Результаты испытаний усилителей СВЧ производства компаний *Hittite*, *Excelics Semicunductor*, и других показали, что в качестве распределения уровня предельной накопленной дозы ($D_{ПНД}$) можно принять усеченное нормальное распределение.

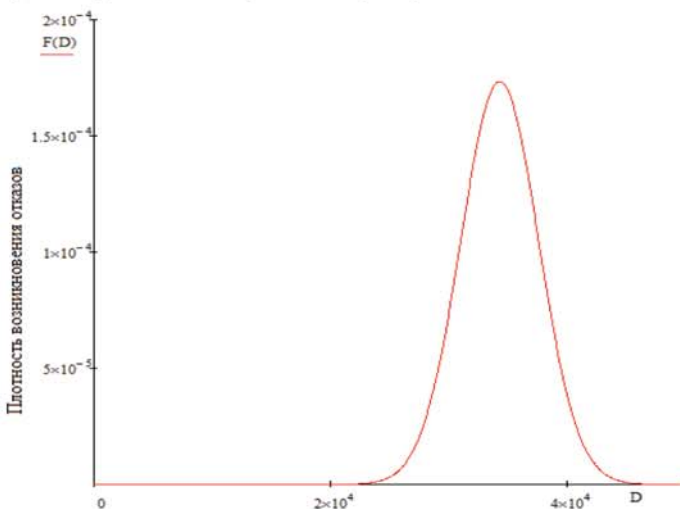


Рис. 2. Усеченное нормальное распределение плотности возникновения отказов

Таким образом, вероятность возникновения отказа в результате накопления дозы можно описать следующим выражением:

$$Q_1 = \int_0^{t_{CAC}} f(D_{ПНД}) = \int_0^{t_{CAC}} \frac{C}{\sigma(D_{ПНД}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\frac{D_{ПНД} - m(D_{ПНД})}{\sigma(D_{ПНД})} \right)^2}{2} \right) dt$$

где: $f(D_{ПНД})$ – плотность вероятности возникновения отказа; $m(D_{ПНД})$ – математическое ожидание уровня стойкости усилителя; $\sigma(D_{ПНД})$ – среднее квадратичное отклонение; $D_{ПНД}$ – накопленная фактически доза; C – нормирующий множитель.

$$C = \frac{1}{F(D_{ПНД_{MAX}}) - F(D_{ПНД_{MIN}})},$$

где: $F(D_{ПНД_{MAX}})$, $F(D_{ПНД_{MIN}})$ – значения функции нормального распределения.

На основе данных, полученных на испытаниях, параметры распределения будут:

$$m(D_{ПНД}) = 34309 \text{ рад}; \sigma(D_{ПНД}) = 3287 \text{ рад}; C = 1,428.$$

Так как по стандарту [7], СВЧ усилители относятся к изделиям общего назначения вида I, непрерывного длительного применения, невосстанавливаемые, необслуживаемые, переход которого в предельное состояние ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении, для них нормируются следующие показатели надежности [3]: интенсивность отказов; средний ресурс; средний срок сохраняемости.

Необходимо определить для усилителя минимальную наработку $T_{м.н.}$. В соответствии со стандартом [6], критерий предельного состояния усилителя формулируется как «Повышение интенсивности отказов выше допустимого уровня λ_{MAX} ». Значение λ_{MAX} можно получить, зная значения Q_1 и t_{CAC} , из уравнения:

$$1 - Q_1 = e^{-\lambda_{MAX} \cdot t_{CAC}}.$$

Для оценки значения $T_{м.н.}$ воспользуемся методологией, приведенной в [4] для прогнозирования показателей безотказности и долговечности, – применим вероятностно-физические модели отказов, рекомендованные в [5].

В соответствие с [8] функция распределения наработки до отказа ИС представляет собой α -распределение:

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

где α , β – параметры распределения.

Параметр α – это относительная скорость изменения определяющего параметра (коэффициент однородности скорости изменения определяющего параметра):

$$\alpha = \frac{D_{ПНД}}{\sigma(D_{ПНД})}.$$

Параметр β – относительный запас долговечности:

$$\beta = \frac{m(D_{ПНД}) \cdot t_{CAC}}{\sigma(D_{ПНД})}.$$

При использовании этой модели, значение $T_{м.н.}$ равно времени эксплуатации РЭА КА t , при котором плотность распределения $f(t) \approx \lambda(t)$ впервые достигает критического значения $f_{кр}(t = T_{м.н.}) \approx \lambda_{MAX}$ [8]. Тогда значение $T_{м.н.}$ можно найти из уравнения разрешив его относительно $T_{м.н.}$:

$$\lambda_{MAX} = \frac{C \cdot \beta}{T_{м.н.}^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\beta}{T_{м.н.}} - \alpha \right)^2}{2}}. \text{ Получаем } T_{м.н.} \approx 25 \text{ лет.}$$

На рис. 3 приведены графики α -распределение наработки до отказа усилителя и $\lambda_{\text{МАХ}}$. Первая точка пересечения кривых является минимальной наработкой до отказа.

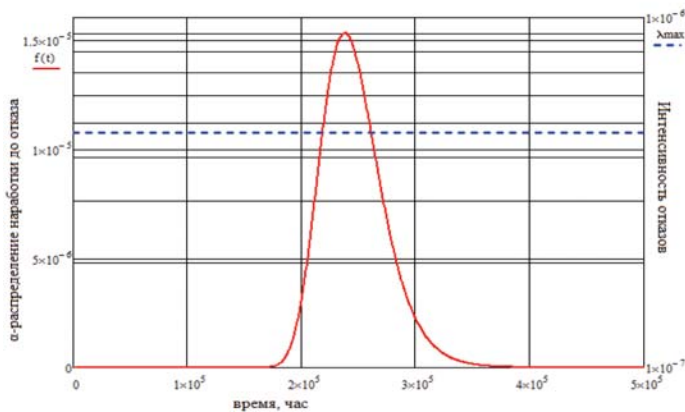


Рис. 3. α -распределение наработки до отказа усилителя СВЧ и $\lambda_{\text{МАХ}}$

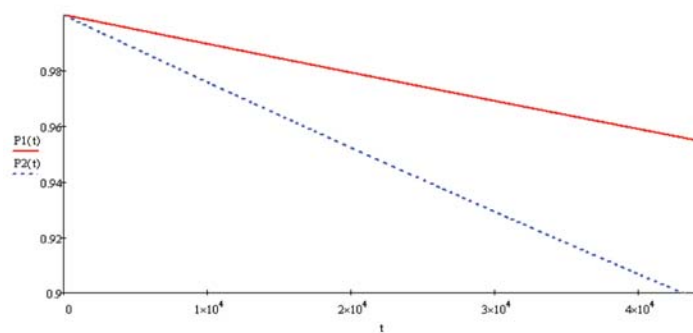


Рис. 4. Вероятность безотказной работы

Оценивая влияние радиации на вероятность безотказной работы усилителя, построим графики $P_1(t)$ и $P_2(t)$:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_{\text{надеж}} \cdot t}, P_2(t) = e^{-(\lambda_{\text{надеж}} + \lambda_{\text{маж}}) \cdot t},$$

На рис. 4 видно, что при учете влияния радиации на интенсивность отказов показатели надежности заметно ухудшаются.

В большинстве своем СВЧ устройства имеют высокие показатели по радиационной стойкости. Ряд исследований, проводимых при участии российских испытательных и научных центров, подтверждают высокую стойкость СВЧ устройств и к импульсному гамма-излучению. Однако, при увеличении САС КА, низкоинтенсивное излучение будет вносить ощутимый вклад в показатели надежности.

Литература

1. Артюхова, М.А., Полесский С.Н., Жаднов В.В. Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры // Электронные компоненты, №1, 2013. – С. 72-76.
2. Полесский С., Жаднов В., Артюхова М., Прохоров В. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и технологии: Научно-технический журнал. №9, 2010. – С. 93-98.
3. Жаднов В.В., Юрков Н.К. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.
4. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств космических систем: научное издание. – Екатеринбург: Изд-во ООО "Форт Диалог-Исеть", 2012. – 565 с.
5. Справочник «Надежность ЭРИ иностранного производства» ред. 2006. – 52 с.
6. РД 134-0139-2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. 2005. – 78 с.
7. ГОСТ 27.003. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
8. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.
9. ГОСТ 27.005. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.

Low intensity radiation effect on SHF devices

Maya Artyukhova, NRU HSE MIEM, Postgraduate student, martuhova@hse.ru

Abstract. Electronic equipment of spacecraft is exposed to ionizing radiation of outer space, which is another reason for failure. Currently accepted to evaluate separately the reliability of electronic equipment and its radiation resistance, despite the fact that these phenomena are interrelated. The aim of the article is to estimate effects of ionizing radiation on the reliability of microwave devices, namely, the probability of failure-free operation of a microwave amplifier. The probability of device failure model $Q(t)$ for active lifetime is constructed as a product of the probabilities of failure $Q_1(t)$ — the probability of device failure due to set the total ionizing dose, $Q_2(t)$ — probability of failure of the device in the absence of exposure to ionizing radiation, $Q_3(t)$ — the probability of a single effect event. Probabilities $Q_2(t)$ and $Q_3(t)$ are valued at current normative documents. Probability $Q_1(t)$ is calculated based on probabilistic and physical models. Research shows that, despite the high radiation resistance of microwave devices used in electronic equipment of spacecraft, when the long lifetime is required the low intensity radiation will have a tangible impact on the probability of failure. And that should be considered when designing equipment.

Keywords: reliability, radiation resistance, microwave devices, ionizing radiation, the probability of failure-free operation, spacecraft.

References

1. Artyukhova MA, Polesskii S.N., Greedy V.V. Assessing the strength of IP for board space equipment / Electronic Components, No1, 2013. pp. 72-76.
2. Polesskii S., Greedy B., Artyukhova B., Prokhorov M. Radiation resistance equipment in the design of spacecraft / Components and Technologies: Scientific and technical journal. No 9, 2010. pp. 93-98.
3. Zhadnov V.V., Jurkov N.K. Features of the construction board of spacecraft: Proc. allowance. Penza, 2012. 112 p.
4. Abrameshin A.E., Zhadnov V.V., Polessky S.N. Information technology ensure the reliability of electronic space systems: scientific publication. Ekaterinburg: Publishing House Ltd. "Fort Dialog-Iset", 2012. 565 p.
5. Handbook "Reliability ESI foreign production" Ed. 2006. 52 p.
6. RD 134-0139-2005. Machinery, equipment, devices and equipment spacecraft. Methods for assessing resistance to charged particles of space on a single malfunction and failure. 2005. 78 p.
7. GOST 27.003. Reliability engineering. Composition and general rules specify requirements for reliability.
8. Druzhinin G.V. Reliability of automated systems. Ed. Third, revised. and add. Moscow: Energiya, 1977. 536 p.
9. GOST 27.005. Reliability engineering. Failure model. The main provisions.