ЗАВИСИМОСТЬ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ ОТ НАБОРА ПАРАМЕТРОВ-КРИТЕРИЕВ ГОДНОСТИ

Г. В. Чуков², В. В. Елесин², Г. Н. Назарова², Н. А. Усачев²,
Д. В. Бойченко², А. Ю. Никифоров¹, А. В. Телец³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

²АО «ЭНПО СПЭЛС», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

³АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Проведён анализ влияния системы параметров-критериев годности и норм на их отклонение на уровне радиационной стойкости изделий твердотельной СВЧ электроники. На типовых примерах показано, что необоснованный выбор параметров-критериев и норм может приводить как к заниженной (в разы), так и к завышенной оценке стойкости. Наиболее общим решением указанной проблемы является проведение определительных испытаний с установлением фактического уровня стойкости и получением зависимостей значений параметров-критериев от значений характеристик специальных факторов.

Ключевые слова: сверхвысокая частота, твердотельная электроника, показатели радиационной стойкости, параметры-критерии

Сведения об авторах: Чуков Георгий Викторович, к.т.н., доцент, gvchuk@spels.ru; Елесин Вадим Владимирович, к.т.н., доцент, vveles@spels.ru; Назарова Галина Николаевна, gnnaz@spels.ru; Усачев Николай Александрович, к.т.н.; Бойченко Дмитрий Владимирович, к.т.н., доцент, dvboy@spels.ru; Никифоров Александр Юрьевич, д.т.н., профессор, aynik@spels.ru; Телец Андрей Витальевич, telets@pulsarnpp.ru

RADIATION HARDNESS ESTIMATION AND ASSURANCE OF SOLID-STATE MICROWAVE ELECTRONICS BY THE CHOICE OF THE CRITERIA PARAMETERS

G. V. Chukov², V. V. Elesin², G. N. Nazarova², N. A. Usachev²,
D. V. Boychenko², A. Yu. Nikiforov¹, A. V. Telets³

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
115409, Moscow, Kashirskoye shosse, 31

²JSC «Specialized Electronic Systems», 115409, Moscow, Kashirskoye shosse, 31

³JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

The analysis of influence of parameters of system of criteria of validity and norms for their deviation from levels of radiation resistance of products of solid-state microwave electronics. In typical examples it is shown that the unreasonable choice of parameters, criteria and norms may lead to lower (a lots) and an overestimation of the resistance. The most common solution to this problem is to conduct defining testing with determine the actual resistance level and obtain the dependence of parameter values of criteria from the values of the characteristics of special factors. In addition, it is recommended to evaluate the possibility of providing time to failure under conditions of changes in electric mode under the influence of special factors.

Keywords: microwave, solid state electronics, radiation hardness index, parameters criteria

Data of authors: Chukov George Viktorovich, Ph. D., associate professor, gvchuk@spels.ru; Elesin Vadim Vladimirovich, Ph. D., associate professor, vveles@spels.ru; Nazarova Galina Nikolaevna, gnnaz@spels.ru; Usachev Nikolay Aleksandrovich, Ph. D.; Boychenko Dmitriy Vladimirovich, Ph. D., associate professor, dvboy@spels.ru; Nikiforov Aleksandr Yuryevich, Ph. D., professor, aynik@spels.ru; Telets Andrey Vitalyevich, telets@pulsarnpp.ru

Введение

В соответствии с действующими нормативными документами [1] изделие считается стойким к радиационным воздействиям, если во время и после воздействия излучений значения его параметров остаются в пределах установленных норм. Таким образом, в некоторых случаях уровень стойкости ЭКБ может быть обеспечен варьированием норм на параметры-критерии (т. е. параметры, выход значений которых за норму определяет стойкость изделия) с соответствующим обеспечением уровней стойкости аппаратуры [2]. В работе рассмотрена возможность применения указанного подхода для современной СВЧ ЭКБ для обоснованного повышения уровня стойкости СВЧ ЭКБ в составе аппаратуры путём выбора норм на значения параметров-критериев.

Выбор контролируемых параметров-критериев годности

Многочисленные результаты испытаний СВЧ ЭКБ отечественного и иностранного производства, проведённые в ИЦ АО «ЭНПО СПЭЛС» и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ, подтверж-

дают необходимость контроля основных информативных СВЧ параметров-критериев стойкости, характеризующих целевую функцию изделия (например, для генераторов – частоту и выходную мощность [3, 4], для малошумящих усилителей – коэффициент усиления и коэффициент шума [5, 6]).

Можно привести достаточно примеров, где уровни стойкости определяются отклонением за норму СВЧ параметров изделий [3-12]. Например, в дискретном программируемом фазовращателе (ФВ) MAPS010163, представляющем собой систему в корпусе и состоящем из двух кристаллов – GaAs многоразрядного ФВ и кремниевое КМОП драйвера управления (ДУ) обнаружен катастрофический отказ (КО). Тиристорный эффект (ТЭ) в ДУ, возникающий при воздействии тяжелых заряженных частиц, приводит к «зависанию» одного разряда ДУ и возрастанию тока потребления примерно в 5000 раз. На рис. 1 показана фазочастотная характеристика (ФЧХ) 64 состояний цифрового ФВ до и после воздействия. Без контроля ФЧХ функциональный отказ не был бы обнаружен.

Рис. 1

ФЧХ многоразрядного ФВ MAPS010163 до (а) и после (б) воздействия

Другим примером могут служить результаты испытаний на стойкость к импульсному воздействию ионизирующего излучения отечественной микросхемы 14-разрядного ступенчатого векторного СВЧ ФВ с параллельным управлением и рабочим диапазоном частот 2,5...3,5 ГГц, изготовленной по SiGe БиКМОП технологии. На рис. 2 по-

казаны синхронные осциллограммы сигнала на выходе ФВ и реакции мощности и фазы сигнала при значении уровня воздействия $7,7 \cdot 10^8$ ед/с и $6,9 \cdot 10^{12}$ ед/с. Уровень бессбойной работы (УБР), определяемый выходом за установленную норму амплитуды импульсной реакции коэффициента передачи (ΔK_n) (превышение на 1 дБ от первоначального зна-

Канал 1: сигнал на входе ФВ: 50 мВ/дел; 5 мкс/дел
Канал 2: сигнал на выходе ФВ: 20 мВ/дел; 5 мкс/дел
Канал 3: отношение выходного сигнала к входному (ΔK_n): 2 дБ/дел; 5 мкс/дел
Канал 4: фазовый сдвиг ($\Delta\phi$): 20 град/дел; 5 мкс/дел

(а)

Канал 1: сигнал на входе ФВ: 50 мВ/дел; 5 мкс/дел
Канал 2: сигнал на выходе ФВ: 20 мВ/дел; 5 мкс/дел
Канал 3: отношение выходного сигнала к входному (ΔK_n): 10 дБ/дел; 5 мкс/дел
Канал 4: фазовый сдвиг ($\Delta\phi$): 20 град/дел; 5 мкс/дел

(б)

Рис. 2

Синхронные осциллограммы сигнала на выходе векторного СВЧ фазовращателя и реакции коэффициента передачи ΔK_n и фазы $\Delta\phi$ сигнала при значении уровня воздействия $7,7 \cdot 10^8$ ед/с (а), $6,9 \cdot 10^{12}$ ед/с (б)

чения), составляет не менее $3,8 \cdot 10^9$ ед/с. Амплитуда импульсной реакции фазы сигнала на выходе ($\Delta\phi$) ФВ монотонно увеличивается с ростом значения уровня мощности. При этом УБР, определяемый выходом за установленную норму $\Delta\phi$ (5,6 град), составляет не менее $7,7 \cdot 10^8$ ед/с (рис. 2а) и ограничивает уровень стойкости микросхемы.

Следует особенно отметить, что параметр «ток потребления», которым зачастую ограничивают состав контролируемых параметров при испытаниях, в ряде случаев не задан в ТТ (ТУ) на изделие. Подобные примеры приведены на рис. 3. Результаты испытаний отечественного СВЧ статического делителя частоты, изготовленного по SiGe БиКМОП технологии, показаны на рис. 3а. С ростом уровня воздействия ток потребления монотонно снижается (т. е. улучшается) вплоть до предельного уровня дозового воздействия $1,2 \cdot 10^6$ ед. При этом выходная мощность СВЧ сигнала монотонно снижается и при уровне воздействия $4 \cdot 10^4$ ед выходит за установленную норму, определяя уровень стойкости изделия. Другим примером могут служить результаты испытаний отечественного СВЧ LD МОП транзистора (рис. 3б). С ростом уровня воздействия ток стока I_c монотонно уменьшается вплоть до предельно-

го уровня дозового воздействия 10^6 ед. При этом коэффициент усиления (K_y) монотонно снижается и выходит за норму, определяя уровень стойкости изделия. В практике радиационных испытаний СВЧ ЭКБ встречается множество подобных примеров.

В случае изделий иностранного производства коммерческого или промышленного назначения норма на отклонение параметров при радиационных испытаниях, как правило, задаётся как предельно допустимые значения параметров, приведённые в технической документации на изделие. Такой подход к выбору норм зачастую приводит к существенному занижению уровня стойкости изделия.

Можно рекомендовать при сертификации СВЧ ЭКБ как иностранного, так и отечественного производства проводить исследовательские испытания и указывать в справочных листах полученные экспериментальные зависимости радиационного изменения параметров. Наличие этих данных у разработчика аппаратуры позволит осознанно устанавливать норму на отклонение параметров и тем самым обоснованно обеспечить уровень радиационной стойкости. Примером реализации такого подхода за рубежом может служить ИС переключателя сигналов

(а)

(б)

Рис. 3

Зависимость тока потребления $I_{\text{п}}$ и выходной мощности $P_{\text{вых}}$ отечественного СВЧ SiGe БиКМОП статического делителя частоты от поглощённой дозы (а);
зависимость тока стока I_c и коэффициента усиления K_y отечественного радиочастотного LD МОП транзистора от поглощённой дозы (б)

PE95420 (радиационно стойкая серия) иностранного производства (ф. Peregrine), изготовленная по КНС технологии. ИС PE95420 предусматривает питание положительным и отрицательным напряжением, статический ток потребления (I_n) определяется токами утечки по затвору проходных и шунтирующих транзисторов и составляет не более 1 мкА [13]. При этом, в соответствии с техническим описанием на микросхему, после дозового воздействия до уровня 20 крад допустим рост I_n по положительному питанию до 100 мкА, по отрицательному питанию – до 0,5 мА, а после воздействия до уровня 100 крад допустим рост I_n по положительному питанию до 0,5 мА, по отрицательному питанию – до 5 мА. Значимая деградация СВЧ параметров ИС до заданного уровня 100 крад отсутствует. Таким образом, уровень стойкости к дозовому воздействию ИС PE95420 увеличен за счёт повышения нормы на отклонение не являющегося практически значимым для СВЧ приложений параметра I_n более чем на три порядка (с 1 мкА до 5 мА).

Допустимо существенно увеличивать норму на некритичные с точки зрения функционирования параметры. Параметр-критерий I_n может в разы снижать уровень стойкости по УБР и ВПР, причём изделие и аппаратура будут работоспособны. Например, данные на рис. 4 показывают, что микросхема радиочастотной СБИС усиления, частотного преобразования, фильтрации и оцифровывания сигналов спутниковых систем навигации, выполненной по КМОП технологии 0,13 мкм, не соответствует требованиям к воздействию импульсного ионизирующего излучения (ИИ): ВПР по параметру ток потребления I_n превышает допустимое значение (превышение на 100% от стационарного значения), что приводит к параметрическому отказу, при этом до требуемого уровня воздействия ТЭ и КО не обнаружено. Функциональный сбой, устраняемый только после перепрограммирования микросхемы, наблюдается только при уровне $5,6 \cdot 10^9$ ед/с. Критерием нормального функ-

Рис. 4

Зависимость ВПР радиочастотной СБИС по параметрам «ток потребления» I_n (норма на отклонение от стационарного значения 100 %) и «выходная мощность» (норма на отклонение от стационарного значения минус 1 дБ) от величины мощности дозы

ционирования являлось наличие сигнала на выходе микросхемы заданной частоты.

Между тем, если положить основным параметром-критерием мощность и частоту выходного сигнала, где нормы взяты обоснованно из ТЗ на ОКР, то СБИС будет соответствовать требованиям.

Заключение

Проанализирована существующая практика задания параметров-критериев и норм на них для ЭКБ СВЧ диапазона. Показано, что для адекватной оценки радиационной стойкости требуется контроль всех функционально значимых СВЧ параметров. В ряде случаев возможно обеспечение радиационной стойкости путём обоснованного повышения норм на отклонение параметров.

Литература

1. Критенко М. Обеспечение качества военной продукции. Новое поколение нормативных документов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – Вып. 4. – С. 50-53.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: научное издание / под. ред. А. И. Чумакова. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
3. Сотсков Д. И., Елесин В. В., Амбуркин Д. М., Кузнецов А. Г., Чуков Г. В. Показатели радиаци-

- онной стойкости интегральных схем ГУН СВЧ-диапазона // Радиационная стойкость электронных систем: научн.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 18. – С. 199-200.
4. Усачев Н.А., Елесин В.В., Сотсков Д.И., Чуков Г.В., Назарова Г.Н., Савченко Е.М., Будяков А.С. Сравнительный анализ ИС СВЧ генераторов, управляемых напряжением, на основе показателей качества и радиационной стойкости // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 208-211.
 5. The Effect of Ionizing Radiation on the Characteristics of Silicon–Germanium Microwave Integrated Circuits / V. V. Elesin, G. V. Chukov, D. V. Gromov, V. V. Repin at al. // Russian Microelectronics, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 122-133.
 6. Назарова Г.Н., Амбуркин К.М., Кузнецов А.Г., Елесин В.В., Полевич С.А., Крутов А.В. Эффекты мощности дозы в современных отечественных СВЧ ИС на основе арсенида галлия // Радиационная стойкость электронных систем: научн.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 18. – С. 195-196.
 7. Назарова Г.Н., Елесин В.В., Никифоров А.Ю., Кузнецов А.Г., Усачев Н.А., Амбуркин Д.М. Составные функциональные блоки для создания радиационно стойких приёмопередающих КМОП КНИ БИС // Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45, № 1. – С. 72-80.
 8. Sotskov D.I., Elesin V.V., Kuznetsov A.G., Nazarova G.N., Chukov G.V., Boychenko D.V., Telets V.A., Usachev N.A. Total Ionizing Dose Effects in Phase-Locked Loop ICs and Frequency Synthesizers // RADECS-2015 Proceedings, 2016, pp. 367-369.
 9. Кузнецов А.Г., Назарова Г.Н., Чуков Г.В., Елесин В.В., Будяков А.С., Савченко Е.М. Радиационная стойкость СВЧ активных смесителей на основе различных полупроводниковых технологий // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2015. – С. 327-331.
 10. Elesin V.V., Sotskov D.I., Chukov G.V., Amburkin K.M., Usachev N.A. Radiation effects in RF frequency divider ICs // 25nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2015), Conference Proceedings, 2015, pp. 808-809.
 11. Назарова Г.Н., Амбуркин К.М., Кузнецов А.Г., Елесин В.В., Полевич С.А., Крутов А.В. Эффекты мощности дозы в современных отечественных СВЧ ИС на основе арсенида галлия // Радиационная стойкость электронных систем: научн.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 18. – С. 195-196.
 12. Chukov G.V., Elesin V.V., Nazarova G.N., Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Kuznetsov A.G., Amburkin K.M. SEE Testing Results for RF and Microwave ICs // IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2014, pp. 233-235.
 13. Product Description PE95420. – Режим доступа: <http://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe95420ds.pdf> (дата обращения: 21.11.17г.).

References

1. Kritenko M. Providing Defense Systems Quality. A New Generation of Normative Documents. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2000, №4, pp. 50-53.
2. *Radiatsionnaya stoykost izdeliy EKB* [Radiation harness of electronic components (ed. by A. I. Chumakov)]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2015, 512 p.
3. Sotskov D.I., Elesin V.V., Amburkin D.M., Kuznetsov A.G., Chukov G.V. Radiation hardness index of microwave VCO integrated circuits. *Radiachionnaya stoykost elektronnykh sistem: nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Scientific and technical collection «Radiation hardness of electronic systems»], 2015, № 18, pp. 199-200.
4. Usachev N.A., Elesin V.V., Sotskov D.I., Chukov G.V., Nazarova G.N., Savchenko E.M., Budya- kov A.S. The comparative analysis of microwave voltage control generators ICs based on quality factors and radiation hardness. *Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XV Russian science and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment»]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar» Publ., 2017, pp. 208-211.
5. The Effect of Ionizing Radiation on the Characteristics of Silicon–Germanium Microwave Integrated Circuits / V. V. Elesin, G. V. Chukov, D. V. Gromov, V. V. Repin at al. // Russian Microelectronics, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 122-133.
6. Nazarova G. N., Amburkin K. M., Kuznetsov A. G., Elesin V. V., Polevich S. A., Krutov A. V. Dosage related effects in advanced domestic GaAs micro-

- wave IC. *Radiachionnaya stoykost elektronnykh sistem: nauchno-tekhnicheskiy sbornik* [Scientific and technical collection «Radiation hardness of electronic systems»], 2015, № 18, pp. 195-196.
7. Nazarova G.N., Elesin V.V., Nikiforov A.Yu., Kuznetsov A.G., Usachev N.A., Amburkin D.M. The Circuit and Functional Blocks for Radiation-Hard Transceiver LSICs in SOI CMOS. *Mikroelektronika* [Russian Microelectronics], 2016, vol. 45, № 1, pp. 68-76.
 8. Sotskov D.I., Elesin V.V., Kuznetsov A.G., Nazarova G.N., Chukov G.V., Boychenko D.V., Telets V.A., Usachev N.A. Total Ionizing Dose Effects in Phase-Locked Loop ICs and Frequency Synthesizers // RADECS-2015 Proceedings, 2016, pp. 367-369.
 9. Kuznetsov A.G., Nazarova G.N., Chukov G.V., Elesin V.V., Budyakov A.C., Savchenko E.M. Radiation hardness of microwave active mixers based on various semiconductor processes. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of Russian science and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment»]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar» Publ., 2015, pp. 327-331.
 10. Elesin V.V., Sotskov D.I., Chukov G.V., Amburkin K.M., Usachev N.A. Radiation effects in RF frequency divider ICs // 25nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2015), Conference Proceedings, 2015, pp. 808-809.
 11. Nazarova G.N., Amburkin K.M., Kuznetsov A.G., Elesin V.V., Polevich S.A., Krutov A.V. Dose rate effects in modern domestic microwave GaAs ICs. *Radiachionnaya stoykost elektronnykh sistem: nauchno-tekhnicheskiy sbornik* [Scientific and technical collection «Radiation hardness of electronic systems»], 2015, № 18, pp. 195-196.
 12. Chukov G.V., Elesin V.V., Nazarova G.N., Nikiforov A.Y., Boychenko D.V., Telets V.A., Kuznetsov A.G., Amburkin K.M. SEE Testing Results for RF and Microwave ICs // IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2014, pp. 233-235.
 13. Product Description PE95420. – URL: <http://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe95420ds.pdf> (accessed 21.11.17).