

С.В Панадій Державний університет телекомунікацій, Київ

МЕТОД ІМОВІРНІСНОЇ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ТАКТОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ СИСТЕМ СУПУТНИКОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ДО ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

Анотація: Робота систем супутникових телекомунікацій характеризується впливом ряду збурень та шумів на їх роботу. А саме адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутовий модуляції (в разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та інших. Поряд з зовнішнім впливом на якість роботи вказаних систем можуть чинити і внутрішні збурення, основними з яких в фазокогерентних системах синхронізації супутникових телекомунікацій є нестабільності тактових генераторів. В даній роботі безпосередньо розглянуто одне з питань забезпечення процесу підтримання заданих значень робочих параметрів функціонування тактового генератора під впливом іонізуючого випромінювання космічного простору – радіаційної стійкості тактових генераторів. Встановлено, що забезпечення радіаційної стійкості тактових генераторів вказаних систем вимагає проведення попередньої оцінки їх виробничих партій з метою встановлення імовірності забезпечення заданих значень робочих параметрів вказаних генераторів при роботі в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору. Для здійснення оцінки радіаційної стійкості виробничих партій тактових генераторів пропонується застосувати імовірнісний підхід, який передбачає встановлення імовірності підтримання заданих параметрів роботи тактових генераторів в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору. Для вирішення завдання по оцінці радіаційної стійкості виробничих партій тактових генераторів в роботі розроблено та запропоновано алгоритм, що базується на імовірнісному підході та дозволяю отримати значення імовірності підтримання робочих параметрів тактових генераторів в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору.

Ключові слова: система синхронізація несучої частоти, фазова нестабільності тактового генератора, оцінка радіаційної стійкості, іонізуюче випромінювання космічного простору.

Panadiy S.V. State University of Telecommunications, Kyiv

METHOD OF PROBABILITY ASSESSMENT OF THE STABILITY OF CLOCK GENERATORS OF SATELLITE TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS FROM THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

Abstract: The operation of satellite telecommunications systems is characterized by the influence of a number of disturbances and noise on their work. Namely, additive fluctuation noise, perturbation of useful angular modulation (in the case of carrier frequency filtering), phase and frequency jumps and others. Along with the external impact on the quality of these systems can have internal disturbances, the main of which in the phase-coherent systems of synchronization of satellite telecommunications are the instability of clock generators. This paper directly considers one of the issues of ensuring the process of maintaining the set values of the operating parameters of the clock generator under the influence of ionizing radiation of outer space - the radiation resistance of clock generators. It is established that ensuring the radiation resistance of clock generators of these systems requires a preliminary assessment of their production batches in order to establish the probability of providing the specified values of operating parameters of these generators when operating under ionizing radiation of outer space. To assess the radiation resistance of production batches of clock generators, it is proposed to apply a probabilistic approach, which involves establishing the probability of maintaining the specified parameters of clock generators under the influence of ionizing radiation of outer space. To solve the problem of estimating the radiation stability of production batches of clock generators, an algorithm based on the probabilistic approach is developed and proposed and the value of the probability of maintaining the operating parameters of clock generators under the influence of ionizing radiation of outer space is obtained.

© Панадій С.В. 2020

Keywords: carrier frequency synchronization system, phase instability of the clock generator, estimation of radiation resistance, ionizing radiation of outer space.

Панадий С.В. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ТАКТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СИСТЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ОТ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Аннотация: Работа систем спутниковых телекоммуникаций характеризуется влиянием ряда возмущений и шумов на их работу. А именно аддитивного флуктуационного шума, возмущения полезной угловой модуляции (при фильтрации несущей частоты), прыжков фазы и частоты и других. Наряду с внешним воздействием на качество работы указанных систем могут оказывать и внутренние возмущения, основными из которых в фазокогерентных системах синхронизации спутниковых телекоммуникаций является нестабильности тактовых генераторов. В данной работе непосредственно рассмотрен один из вопросов обеспечения процесса поддержания заданных значений рабочих параметров функционирования тактового генератора под влиянием ионизирующего излучения космического пространства - радиационной стойкости тактовых генераторов. Установлено, что обеспечение радиационной стойкости тактовых генераторов указанных систем требует проведения предварительной оценки их производственных партий с целью установления вероятности обеспечения заданных значений рабочих параметров указанных генераторов при работе в условиях воздействия ионизирующего излучения космического пространства. Для оценки радиационной стойкости производственных партий тактовых генераторов предлагается применить вероятностный подход, предусматривающий установление вероятности поддержания заданных параметров работы тактовых генераторов в условиях воздействия ионизирующего излучения космического пространства. Для решения задачи по оценке радиационной стойкости производственных партий тактовых генераторов в работе разработан и предложен алгоритм, основанный на вероятностном подходе и позволяющий получить значение вероятности поддержания рабочих параметров тактовых генераторов в условиях воздействия ионизирующего излучения космического пространства.

Ключевые слова: система синхронизация несущей частоты, фазовая нестабильности тактового генератора, оценка радиационной стойкости, ионизирующее излучение космического пространства.

1. Вступ

У різні радіотехнічні пристрої супутникової та іншої техніки зв'язку, радіолокації і управління а також в пристрої точного магнітного запису широко впроваджені системи фазової синхронізації. Зокрема, в фазокогерентних системах супутникових телекомунікації і управління вони застосовуються для відновлення несучої і тактовою частот та для когерентної демодуляції аналогових і цифрових сигналів з кутовою модуляцією [1].

Робота систем синхронізації супутникових телекомунікацій характеризується впливом ряду збурень та шумів на їх роботу. А саме адитивного флуктуаційного шуму, збурення корисної кутовий модуляції (в разі фільтрації несучої частоти), стрибків фази і частоти та інших. В лініях космічного зв'язку, наприклад, основними зовнішніми збуреннями є адитивний гаусівський шум і доплерівські зміщення частоти.

Поряд з зовнішнім впливом на якість роботи системи фазової синхронізації можуть чинити і внутрішні збурення, основними з яких в фазокогерентних системах є нестабільності тактових генераторів (генераторів, що підлаштовуються) [2].

В свою чергу одним з видів шуму вказаного генератора, може бути шум, викликаний впливом одного з видів зовнішнього шуму, а саме шуму, викликаного впливом іонізуючого випромінювання космічного простору (ІВ КП) на елементну базу пристроїв та приладів систем зв'язку – радіаційний вплив [3].

2. Постановка задачі

Основні фактори космічного простору, які формують радіаційний вплив на матеріали і радіоелектронну апаратуру космічних засобів зв'язку наступні [3]:

- потоки електронів і протонів радіаційних поясів Землі;
- потоки протонів, сонячних космічних променів і галактичних важких заряджених частинок.

Ефекти радіаційного впливу

- накопичення іонізаційних ефектів і структурних пошкоджень в матеріалах і;
- збої і відмови елементарних електронних приладах при впливі протонів та інших іонізуючих частинок космічного випромінювання.

Вимоги стійкості, міцності та стійкості апаратури систем космічного зв'язку визначаються інтегральними ефектами в матеріалах елементів під впливом ІВ КП.

Короткочасні збої і оборотні відмови можуть спостерігатися в апаратурі внаслідок прояву іонізаційних ефектів в напівпровідникових приладах під впливом іонізуючого випромінювання космічного простору. При цьому визначальними є диференціальні характеристики випромінювання - щільність енерговиділення в чутливих обсягах напівпровідників.

У загальному вигляді вплив ІВ КП на генератори системи синхронізації проявляється у вигляді змін як умов протікання внутрішніх процесів, на яких базується принцип роботи цих приладів, так і змін внутрішньої структури матеріалу, з якого вони виготовлені, що так само впливає на перебіг внутрішніх процесів в них. Таким чином, під впливом іонізуючого випромінювання в генераторах виникає явище, що отримало назву радіаційний ефект - зміна технічних характеристик під впливом іонізуючого випромінювання.

Радіаційні ефекти призводять до оборотним (стаціонарним) і незворотнім (квазістабільності) змін технічних характеристик приладів [3,4]

Одним із зовнішніх проявів радіаційних ефектів в напівпровідниковій елементній базі генератора з складу системи синхронізації є зростання його внутрішнього шуму [4].

Системи синхронізації супутникових систем зв'язку, що працюють в умовах різних впливів, в тому числі ІВ КП, повинні характеризуватися малою дисперсією фазової помилки і високою швидкодією. Очевидно, що для ефективної роботи вказаної системи в цілому, в тому числі, необхідно безпосередньо забезпечити високу точність роботи системи фазової синхронізації в сталому і перехідному режимах під впливом як зовнішніх так і внутрішніх збурень [1].

Одним з методів забезпечення стійкості системи синхронізації від впливу ІВ КП є безпосереднє підтримання заданих параметрів роботи тактових генераторів під впливом ІВ КП. Таке забезпечення вимагає попередньої оцінки стійкості тактових генераторів систем супутникового зв'язку від впливу ІВ КП. Сутність оцінки полягає в визначенні можливості в підтриманні заданих параметрів роботи тактових генераторів в умовах впливу вказаних випромінювань.

Вказана оцінка має ряд особливостей основний зміст яких полягає в тому, що для отримання необхідної статистики такі випробування повинні бути дуже тривалими. Тому, оцінку стійкості комплектуючих та елементів пристроїв впливу ІВ КВ, проводять або розрахунковим, або розрахунково-експериментальним шляхом, з використанням результатів, що отримані під час радіаційних випробувань партій комплектуючих на моделюючих установках [4, 5]. Результати випробувань окремих партій комплектуючих показують, що існує великі розбіжності між партіями по впливу КВ, а саме отриманню гранично накопиченої дози (ГНД) [6, 7].

Наприклад розбіжності партій мікросхем типу CDP1821 при різній потужності дози гама-випромінювання на рис.1 [6] показує значну залежність ГНД від потужності дози іонізуючого випромінювання.

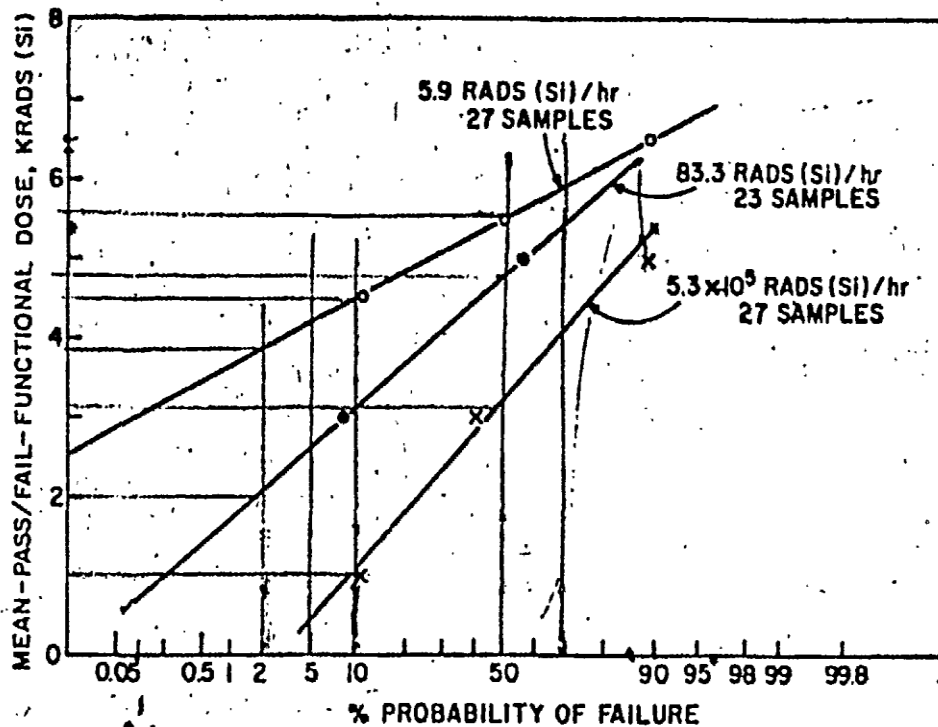


Рис.1. Розподіл радіаційних відмов МОП мікросхем типу CDP1821 при різних потужностях дози іонізуючого випромінювання [6]

Показані результати підтверджують великі розбіжності між партіями однотипних приладів по радіаційній стійкості.

Вказана проблема породжує часткове наукове завдання по розробці методики оцінки стійкості тактових генераторів, як окремих складових ланок з структури систем синхронізації супутникових систем зв'язку, як б враховувала розбіжності між різними партіями виготовлення однотипних генераторів.

3. Аналіз досліджень і публікацій

Питанню оцінки стійкості окремих виробничих партій елементної бази систем зв'язку від впливу ІВ КП присвячено ряд робіт. Найбільш показовими по висвітленню питання оцінки окремих ланок елементної бази радіотехнічних пристроїв щодо впливу ІВ КП з яких є наступні.

В роботі [8] подані результати досліджень по розробці радіаційно стійких інтегральних мікросхем. Основний напрямок досягнення високих показників радіаційної стійкості, що поданий в даній роботі, це забезпечення стійкої внутрішньої структури схеми в процесі виробництва. Методика оцінки різних партій таких схем до забезпечення рівних показників радіаційної стійкості в роботі відсутня після їх виготовлення.

Робота [9] присвячена забезпеченню радіаційної стійкості напівпровідникової елементної бази на етапі виробництва. В даній роботі описана технологія виробництва напівпровідникової елементної бази радіотехнічного пристрою по забезпеченню їх високої радіаційної стійкості. Методи оцінки таких виробничих партій таких елементів та методика їх оцінки в роботі відсутні

В роботі [10] описана методика оцінки напівпровідникових схем радіотехнічних пристроїв до радіаційних ефектів, що формуються окремими іонізуючими частинками космічного простру. Методи оцінки загальної радіаційної стійкості виробничих партій таких елементів та методика їх оцінки в роботі відсутні.

4. Мета дослідження

Таким чином, формування алгоритму і на його основі методики оцінки стійкості тактових генераторів, як окремих складових ланок системи синхронізації супутникової

телекомунікації після їх виробництва є актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячена дана стаття.

5. Результати досліджень

У загальному випадку фазова модуляція сигналу містить чотири складові [11, 12]:

$$\varphi_{\text{вх}}(t) = d(t) + M(t) + \Delta\psi(t) + N(t) \quad (1)$$

де $d(t)$ – доплерівський зсув на вході;

$M(t)$ – корисна кутова модуляція;

$\Delta\psi(t)$ – нестабільність генераторів.

Як зазначалось раніше, зростання внутрішнього шуму генератора системи синхронізації під впливом ІВ КП викликає зміну його роботи в напрямку підвищення саме нестабільності роботи [3, 4].

При когерентному прийомі необхідне точне знання поточної фази несучого коливання. При використанні системи синхронізації як фільтру фази, вхідним сигналом ϵ , у відповідності до виразу (1) сума $d(t) + \Delta\psi(t)$, де $\Delta\psi(t) = \psi_1(t) - \psi_2(t)$, $\psi_2(t)$ – нестабільності тактового генератора (генератора, що підлаштовується). Процеси $M(t)$ і $N(t)$ представляють в даному випадку перешкоду.

Дисперсія фазової помилки викликана нестабільність його роботи під впливом ІВ КП, складається з чотирьох компонентів [12]:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \sigma_d^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2 + \sigma_M^2 + \sigma_N^2, \quad (2)$$

кожна з яких відповідно до спектральної теорії визначається наступним чином:

$$\sigma_1^2 = \sigma_d^2 + \sigma_{\Delta\varphi}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\varphi}(j\omega)|^2 G_s(\omega) d\omega, \quad (3)$$

$$\sigma_2^2 = \sigma_M^2 + \sigma_N^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\varphi}(j\omega)|^2 G_n(\omega) d\omega, \quad (4)$$

де $W(S) = 1 - W_{\varphi}(S)$.

Для даного випадку $G_s(\omega) = G_d(\omega) + G_{\Delta\kappa}(\omega)$, $G_n(\omega) = G_M(\omega) + G_N(\omega)$.

Передавальна функція по помилці ЗСС визначена виразом (5) [13, 14]:

$$W(S) = \frac{1}{1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)} = \frac{T_2(S+1)S}{a_0S^2 + a_1S + a_2} = \frac{D_{\varphi 30}(S)S^{\nu_3}}{F_3(S)} \quad (5)$$

отже, передавальна функція $W_3(S)$ буде:

$$W_3(S) = [W_1(S)W_2(S)W_3(S)] / [1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)] \quad (6)$$

З виразів (5), (6) видно, що мінімізувати величину σ_{φ}^2 можна лише шляхом відповідного підбору параметрів ланок $W_1(S) - W_3(S)$. В свою чергу, підбір таких параметрів залежить

від можливості схеми та безпосередньо тактового генератора з його складу по забезпеченню стійкість робочих параметрів в умовах впливу ІВ КП.

Забезпечення радіаційної стійкості вказаних генераторі досягається технологіями виробництва їх складових елементів. Але в цілому сам генератор, як складний радіоелектронний пристрій має свої особливості щодо підтримання заданих параметрів радіаційної стійкості в заданих значеннях.

Однією з таких особливостей є загальна розбіжність робочих параметрів по радіаційній стійкості всього пристрою, яка породжується вказаними розбіжностями його складових елементів, про що було зазначено вище [6, 7]/

Проблему розбіжності радіаційної стійкості комплектуючих пристроїв систем супутникових телекомунікацій по ГНД пропонується вирішити наступним чином:

встановити запас стійкості по ГНД;

застосувати підхід по імовірності щодо оцінки збереження параметрів радіаційної стійкості пристроєм під дією ІВ КП.

Запас стійкості по ГНД доцільно приймати не менш ніж трикратним. Тобто, мінімальне значення ГНД, яке отримане за результатами випробувань партій комплектуючих на моделюючих установках, потрібно зменшити у 3 рази, що буде характеризувати ГНД конкретного комплектуючого у складі пристрою СТС. Однак, у [15] показано, що іноді потребується запас по ГНД у 7 разів.

Під час застосування підходу по ймовірності визначення ГНД всі комплектуючі розкладаються на 10 груп по коефіцієнту радіаційного пошкодження K_{po} у функції, яка розподіляє ймовірності радіаційних відмов:

$$q_p(D) = e^{(K_p D)^\beta} - 1 \quad (7)$$

де, D – поглинена доза іонізуючого опромінення, $\beta = 2$ – параметр форми, а $q_p(D) < 0,5$ – ймовірність відмови.

Імовірність безперервної роботи при такому підході визначається як [5]

$$p = p_p \cdot p_0 \quad (8)$$

де, p_p та p_0 – ймовірності відсутності відмов комплектуючих мікросхем радіаційно-стимульованих та випадкових відповідно.

Використовуючи (7), визначаємо імовірність відсутності радіаційної відмови наступним чином [5, 15]:

$$p_p = 1 - q_p = 2 - e^{(K_p D)^2} \quad (9)$$

За результатами радіаційних випробувань партій комплектуючих, які складаються з N_0 штук, визначається значення коефіцієнту їх радіаційного пошкодження. При відмові $N_{відм}$ кількості комплектуючих, визначається максимальна кількість тих мікросхем що відмовили $\alpha(N_{відм})$ під час впливу дози іонізуючого опромінювання D_0 для визначення ймовірності p^* . В такому випадку отримаємо імовірність радіаційної відмови [15,16]:

$$q_0(D_0) = \frac{\alpha(N_{відм})}{N_0} \quad (10)$$

Значення $q_0(D_0)$ дозволяє визначити коефіцієнт радіаційного пошкодження [15]

$$K_q = \frac{\sqrt{\ln[1+q_0(D_0)]}}{D_0}. \quad (11)$$

Слід зазначити, що при великих значеннях $q_0 > 0,5$, необхідно використовувати розподілення Вейбула, як це зроблено в [6], або нормальний закон розподілення, що зазначено в роботах [7, 16].

Таким чином, алгоритм імовірнісної оцінки стійкості тактових генераторів з складу схеми синхронізації супутникових систем телекомунікації від впливу іонізуючого випромінювання космічного простору включає етапи:

- визначення імовірності радіаційних відмови контрольної партії зразка в загальній виробничій партії зразків генераторів по вир.(10);
- визначення коефіцієнту радіаційного пошкодження генераторів по вир.(11);
- ранжування генераторів по групам відповідно коефіцієнту радіаційного пошкодження;
- визначення імовірності радіаційних відмов груп по вир.(7);
- визначення імовірності безперервної роботи груп по вир.(8);
- визначення імовірності відсутності радіаційної відмови по вир.(9);
- визначення імовірності радіаційної відмови (зміни робочих параметрів) по вир.(10).

Отримані значення імовірності в подальшому використовуються для оцінки можливості застосування вказаної партії зразків для подальшого включення їх в схеми синхронізації супутникових систем синхронізації.

6. Висновки

В роботі розглянуті питання оцінки радіаційної стійкості тактових генераторів систем супутникового зв'язку від впливу іонізуючого випромінювання космічного простору.

Встановлено, що забезпечення радіаційної стійкості тактових генераторів вказаних систем вимагає проведення попередньої оцінки їх виробничих партій з метою встановлення імовірності забезпечення заданих значень робочих параметрів вказаних генераторів при роботі в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору.

Для здійснення оцінки радіаційної стійкості виробничих партій тактових генераторів пропонується застосувати імовірнісний підхід, який передбачає встановлення імовірності підтримання заданих параметрів роботи тактових генераторів в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору.

Для вирішення завдання по оцінці радіаційної стійкості виробничих партій тактових генераторів в роботі розроблено та запропоновано алгоритм, що базується на імовірнісному підході та дозволяю отримати значення імовірності підтримання робочих параметрів тактових генераторів в умовах впливу іонізуючого випромінювання космічного простору.

Список використаної літератури

1. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех / Б.И. Шахтарин. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. –360 с.
2. Габриэльян Д.Д. Новый метод стабилизации частоты генераторов / Д.Д. Габриэльян., И.А. Енгибарян, О.А.Сафарьян // REDS: телекоммуникационные устройства и системы. – 2014. – Том. 4. №1. – С.30-34.
3. Кузнецов Н. В. Регистрация и прогнозирование поглощенных доз радиации от потоков солнечных протонов на борту орбитальных станций/ Н. В. Кузнецов, Р. А. Ныммик, М. И. Панасюк, Э. Н. Сосновец, М. В. Тельцов // Космические исследования. – 2004. – Т. 42. № 3. – С. 211–218.
4. Ohshima T. Radiation Resistance of Semiconductors. In: Radiation Applications. An Advanced Course in Nuclear Engineering / T. Ohshima, S. Onodaa. Singapore: Springer., 2018. Vol 07.

5. Московская Ю. Общий методический подход к оценке радиационной стойкости БМК и полужаказных БИС на их основе / Ю.Московская // Нано Индустрия: Военные и космические технологии. – 2017. –№1 (71). – С. 50– 59.
6. Харкевич Г.И. Модель Вейбулловского распределения при расчете вероятности отказов ИС по радиационной стойкости / Г.И. Харкевич // Вопросы атомной науки и техники. Сер.Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. ЦНИИАтоминформ, 2000. –Вып.3-4. –С.22-26.
7. Brucker G.J.. Exposure - dose - rate - dependence for a CMOS/SOS memory / G.J. Brucker/ IEEE Trans, on Nucl. Sci. – 1981. – Vol.NS-28. No 6. –Рр.4056-4059.
8. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле / В. Юдинцев // Электроника НТБ. – 2007. –№ 5. – С. 72-77.
9. Мироненко Л. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологии / Л.Мироненко, В.Юдинцев // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. – 2012. –№8 (00122). – С. 74 – 87.
10. Чумаков А.И. Методика оценки параметров чувствительности ИС к тиристорному эффекту при воздействии отдельных ядерных частиц / А.И. Чумаков, А.А. Печенкин, А.Н. Егоров и другие // Микроэлектроника. – 2008. –Т. 37. –С. 45–51.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е издание.:Пер. с английского / Б.Скляр. М. :Издательский дом «Вильямс», 2003. –1099 с.
12. Бондаренко В.Н. Помехоустойчивость приема спектрально-эффективных шумоподобных сигналов: монография / В.Н. Бондаренко. Красноярск :Сибирский Федеральный Университет, 2015. – 160 с.
13. The Art of Electronics : 3rd edition / P. Horowitz and W. Hill. Cambridge :Cambridge University Press, 2015, – 1220 p.
14. Поликаровских А. И. Современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов / А. И. Поликаровских // Вестник Воронежского государственного технического университета. –2014. –Т. 10, № 4. –С. 100-108.
15. Попов В.Д. Вероятность безотказной работы ИС при различных «запасах» по дозе ионизирующего излучения / В.Д. Попов // Радиационная стойкость электронных систем - «Стойкость-2001 ». –М.: СПЭЛС,2001. –Вып.4.-С.29-30.
16. Попов В.Д. Метод прогнозирования времени нормального функционирования интегральных микросхем при низкоинтенсивном (РОД рад/с) облучении / В.Д. Попов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.:Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру – М.: ЦНИИАто минформ, 2002. – Вып.4. – С.91-92.

References

1. Shakhtarin B.I. Analiz sistem sinkhronizatsii pri nalichii pomekh [Analysis of synchronization systems in the presence of interference] / B.I. Shakhtarin. М.: Goryachaya liniya – Telekom, 2016. –360 s.
2. Gabriel'yan D.D. Novyy metod stabilizatsii chastoty generatorov [A new method for stabilizing the frequency of generators] / D.D Gabriel'yan., I.A. Yengibaryan, O.A.Safar'yan // REDS: telekommunikatsionnyye ustroystva i sistemy. – 2014. – Tom. 4 . №1. – S.30-34.
3. Kuznetsov N. V. Registratsiya i prognozirovaniye pogloshchennykh doz radiatsii ot potokov solnechnykh protonov na bortu orbital'nykh stantsiy [Registration and prediction of absorbed radiation doses from solar proton fluxes aboard orbital stations] / N. V. Kuznetsov, R. A. Nymmik, M. I. Panasyuk, E. N. Sosnovets, M. V. Tel'tsov // Kosmicheskiye issledovaniya. – 2004. – Т. 42. № 3. – S. 211–218.
4. Ohshima T. Radiation Resistance of Semiconductors. In: Radiation Applications. An Advanced Course in Nuclear Engineering / T. Ohshima, S. Onodaa. Singapore: Springer., 2018. Vol 07.
5. Moskovskaya YU. Obshchiy metodicheskiy podkhod k otsenke radiatsionnoy stoykosti BМК i poluzakaznykh BIS na ikh osnoveyu [General methodological approach to assessing the

radiation resistance of BMK and semi-custom LSIs based on them / Y.U.Moskovskaya // Nano Industriya: Voyennyye i kosmicheskiye tekhnologii. – 2017. –№1 (71). – S. 50– 59.

6. Kharkevich G.I. Model' Veybullovskogo raspredeleniya pri raschete veroyatnosti otkazov IS po radiatsionnoy stoykosti [Model of the Weibull distribution in calculating the probability of IC failures based on radiation resistance] / G.I. Kharkevich // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu. TSNIIAtominform, 2000. –Vyp.Z-4. –S.22-26.

7. Brucker G.J.. Exposure - dose - rate - dependence for a CMOS/SOS memory / G.J. Brucker/ IEEE Trans, on Nucl. Sci. – 1981. – Vol.NS-28. No 6. –Pp.4056-4059.

8. Yudintsev V. Radiatsionno-stoykiye integral'nyye skhemy. Nadezhnost' v kosmose i na zemle [Radiation-resistant integrated circuits. Reliability in space and on the ground] / V. Yudintsev // Elektronika NTB. – 2007. –№ 5. – S. 72-77.

9. Mironenko L. Povysheniye radiatsionnoy stoykosti integral'nykh skhem. Konstruktivnyye metody na baze promyshlennoy tekhnologii [Increase of radiation resistance of integrated circuits. Constructive methods based on industrial technology] / L.Mironenko, V.Yudintsev // ELEKTRONIKA: nauka, tekhnologiya, biznes. – 2012. –№8 (00122). – S. 74 – 87.

10. Chumakov A.I. Metodika otsenki parametrov chuvstvitel'nosti IS k tiristornomu effektu pri vozdeystvii otdel'nykh yadernykh chastits [Methodology for assessing the parameters of the IC sensitivity to the thyristor effect under the influence of individual nuclear particles] / A.I. Chumakov, A.A. Pechenkin, A.N. Yegorov i drugiye // Mikroelektronika. – 2008. –T. 37. –S. 45– 51.

11. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye. 2-ye izdaniye.:Per. s angliyskogo [Theoretical foundations and practical application] / B. Sklyar. M. :Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2003. –1099 s.

12. Bondarenko V.N. Pomekhoustoychivost' priyema spektral'no-effektivnykh shumopodobnykh signalov: monografiya [Noise immunity of receiving spectrally effective noise-like signals: monograph] / V.N. Bondarenko. Krasnoyarsk :Sibirskiy Federal'nyy Universitet, 2015. – 160 s.

13. The Art of Electronics : 3rd edition / P. Horowitz and W. Hill. Cambridge :Cambridge University Press, 2015, – 1220 p.

14. Polikarovskikh A. I. Sovremennyye opornyie generatory dlya sistem sinteza chastot i signalov [Modern reference generators for systems of synthesis of frequencies and signals] / A. I. Polikarovskikh // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –2014. – T. 10, № 4. –S. 100-108.

15. Popov V.D. Veroyatnost' bezotkaznoy raboty IS pri razlichnykh «zapasakh» po doze ioniziruyushchego izlucheniya [Probability of failure-free operation of the IC with different "reserves" for the dose of ionizing radiation] / V.D. Popov // Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem - «Stoykost'-2001 ». –M.: SPELS,2001. –Vyp.4.-S.29-30.

16. Popov V.D. Metod prognozirovaniya vremeni normal'nogo funktsionirovaniya integral'nykh mikroskhem pri nizkointensivnom (ROD rad/s) obluchenii [A method for predicting the time of normal functioning of integrated circuits at low-intensity (LOD rad / s) irradiation] / V.D. Popov // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.:Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu – M.: TSNIIAto minform, 2002. – Vyp.4. – S.91-92.