

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.019

## Анализ вероятностных характеристик электрических параметров широкополосного балансного смесителя частот СВЧ радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов и оценка его надежности

<sup>1</sup>Черкасов К.В., <sup>2</sup>Романов И.А., <sup>1</sup>Мешков С.А., <sup>1</sup>Шашурин В.Д.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, <http://bmstu.ru/>  
Москва 105005, Российская Федерация

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. акад. А.И. Берга, <http://www.cnirti.ru/>  
Москва 107078, Российская Федерация

E-mail: [kvche@mail.ru](mailto:kvche@mail.ru), [musicfox@yandex.ru](mailto:musicfox@yandex.ru), [sb67241@mail.ru](mailto:sb67241@mail.ru), [schashurin@bmstu.ru](mailto:schashurin@bmstu.ru)

Поступила 13.10.2020, рецензирована 29.10.2020, принята 09.11.2020

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Объектом исследования является широкополосный балансный смеситель частот (БСм) радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов (РТД). Целями работы являются статистический анализ влияния технологических разбросов параметров конструкции БСм РТД на разброс его электрических характеристик и исследование кинетики этих характеристик в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. В результате ранжирования вкладов технологических разбросов параметров конструкции БСм РТД в разброс электрических характеристик установлено, что наибольший вклад в данный разброс вносит разброс ВАХ нелинейных элементов БСм. Исследование надежности БСм РТД показало, что для обеспечения надежности рассматриваемого смесителя при эксплуатации в условиях действия повышенной температуры требуется конструкторско-технологическая оптимизация его электрических характеристик.

**Ключевые слова:** резонансно-туннельный диод, нелинейные преобразователи частоты радиосигналов, надежность, компьютерный статистический эксперимент

PACS: 84.40.Lj; 85.40.-e; 85.30.Mn; 85.40.Qx; 85.40.Bh.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90125/19.

**Для цитирования:** Черкасов К.В., Романов И.А., Мешков С.А., Шашурин В.Д. Анализ вероятностных характеристик электрических параметров широкополосного балансного смесителя частот СВЧ радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов и оценка его надежности. *РЭНСИТ*, 2021, 13(1):19-26. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.019.

## Analysis of the probabilistic characteristics of the electrical parameters of a broadband balanced mixer of microwave radio signals based on resonant tunneling diodes and an assessment of its reliability

Kirill V. Cherkasov, Sergey A. Meshkov, Vasily D. Shashurin

Bauman Moscow State Technical University, <http://bmstu.ru/>  
Moscow 105005, Russian Federation

E-mail: [kvche@mail.ru](mailto:kvche@mail.ru), [sb67241@mail.ru](mailto:sb67241@mail.ru), [schashurin@bmstu.ru](mailto:schashurin@bmstu.ru)

Ivan A. Romanov

A.I. Berg Central Research Institute of Radioengineering, <http://cnirti.ru/>  
Moscow 107078, Russian Federation

E-mail: [musicfox@yandex.ru](mailto:musicfox@yandex.ru)

Received October 13, 2020, peer-reviewed 29 October, 2020, accepted 09 November, 2020

**Abstract:** The object of research is the broadband balanced SHF mixer (BM) based on resonant-tunneling diodes (RTDs). The research goals are to perform the statistical analysis of BMs design parameters technological errors impact on its electrical characteristics scatter, and to analyze the kinetics of these characteristics under the destabilizing factors influence. The ranging of BMs design parameters technological errors impacts on its electrical characteristics scatter revealed that the biggest impact is made by the technological errors of the BMs non-linear elements I-V characteristics. The BMs reliability study revealed that to ensure the studied BMs reliability during operation under high temperatures impact the design and technological optimization of the BMs electrical characteristics is required.

**Keywords:** resonant tunneling diode, nonlinear frequency converters of radio signals, reliability, computer statistical experiment

**PACS:** 84.40.Lj; 85.40.-e; 85.30.Mn; 85.40.Qx; 85.40.Bh.

**Acknowledgments:** The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-37-90125/19.

**For citation:** Kirill V. Cherkasov, Ivan A. Romanov, Sergey A. Meshkov, Vasily D. Shashurin. Analysis of the probabilistic characteristics of the electrical parameters of a broadband balanced mixer of microwave radio signals based on resonant tunneling diodes and an assessment of its reliability. *RENSIT*, 2021, 13(1):19-26. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.019.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (20)
  2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ (21)
  3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗБРОСОВ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ БСМ НА БАЗЕ РТД НА РАЗБРОС ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК (21)
  4. КИНЕТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БСМ НА БАЗЕ РТД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ (23)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (25)
- ЛИТЕРАТУРА (26)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные преобразователи частоты (ПЧ) радиосигналов являются ключевыми элементами радиотехнических систем, так как с их помощью осуществляются основные радиотехнические преобразования. Электрические характеристики ПЧ радиосигналов определяют электрические характеристики многих радиотехнических систем. Одним из путей улучшения электрических характеристик ПЧ радиосигналов является использование наноэлектронных приборов, к которым относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на основе AlGaAs/GaAs многослойных гетероструктур с поперечным токопереносом [4]. Улучшение электрических характеристик ПЧ достигается за счет подбора оптимальной формы вольт-амперной характеристики (ВАХ) посредством варьирования толщины и химического состава

слоёв резонансно-туннельной структуры (РТС) [14,15]. Применение РТД позволяет расширить рабочий диапазон частот до ТГц [1-3,6,10,13,16] и повысить помехоустойчивость ПЧ. Производство РТД возможно с использованием отработанных технологий микроэлектроники.

При проектировании ПЧ радиосигналов помимо обеспечения заданных электрических характеристик приоритетной является задача обеспечения надёжности в заданных условиях эксплуатации. Для решения последней задачи необходимо проведение оценки надёжности рассматриваемого прибора. Поскольку оценка надёжности приборов экспериментальными методами является затратной, представляется актуальным исследование кинетики электрических характеристик ПЧ на базе РТД в условиях воздействия дестабилизирующих факторов с учетом влияния технологических разбросов параметров конструкции ПЧ на разброс его электрических характеристик и оценка надёжности по постепенным отказам посредством компьютерного статистического эксперимента. Постепенный отказ ПЧ на базе РТД вызван постепенным ухудшением его электрических характеристик в результате необратимой деградации ВАХ РТД в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Одним из путей решения задачи обеспечения надёжности ПЧ радиосигналов в заданных условиях эксплуатации является

изложенная в [5] методология проектирования микро- и наноприборов, предлагающая введение этапа конструкторско-технологической оптимизации, позволяющего определить поправки на номинальные значения параметров конструкции прибора и его электрических характеристик, максимизирующие заданную целевую функцию, при этом оставляя неизменными технологические допуски на параметры конструкции и определённые разработчиком допуски на электрические характеристики оптимизируемого прибора. В качестве целевой функции принимается гамма-процентная наработка до отказа. Данный подход предполагает использование методов имитационного, в том числе вероятностного, моделирования электрических характеристик прибора, для установления закономерностей их деградации в заданных условиях эксплуатации, а также технологических погрешностей и основывается на результатах исследований процессов деградации элементов прибора в условиях воздействия внешних факторов.

На основании вышеизложенного, для решения задачи обеспечения надёжности ПЧ радиосигналов наиболее целесообразным представляется использование программного комплекса, позволяющего осуществлять анализ надёжности ПЧ расчетными методами и проводить конструкторско-технологическую оптимизацию электрических характеристик ПЧ радиосигналов на базе РТД для обеспечения требуемых показателей надёжности в заданных условиях эксплуатации. Наличие такого программного комплекса позволит повысить надёжность и качество ПЧ на базе РТД, а также увеличить эффективность производства данных ПЧ. Для того, чтобы повысить эффективность и быстродействие алгоритмов оптимизации, представляется целесообразным определить параметры конструкции ПЧ, вносящие основной вклад в разброс его электрических характеристик. Таким образом, представляется актуальным решение задачи выявления параметров конструкции ПЧ радиосигналов на базе РТД, технологические разбросы которых вносят наибольший вклад в распределение электрических характеристик ПЧ.

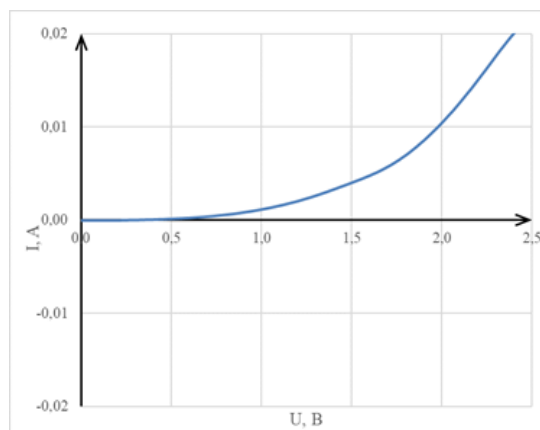


Рис. 1. Начальный участок ВАХ РТД.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе исследуется широкополосный балансный смеситель частот (БСм) диапазона 4-8 ГГц на базе резонансно-туннельных диодов (РТД). Начальный участок ВАХ НЭ приведен на рис. 1. Моделирование электрических характеристик смесителя проводится в САПР AWR Microwave Office.

## 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗБРОСОВ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ БСМ НА БАЗЕ РТД НА РАЗБРОС ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В качестве электрических характеристик рассматриваются потери преобразования составляющих спектра выходного сигнала (ССВС) 1-1 и 2-2 (рис. 2). Первый индекс в номере ССВС обозначает  $n$ -ю гармонику сигнала частоты  $f_s$ , второй —  $m$ -ю гармонику гетеродина частоты  $f_b$ , которые формируют ССВС  $n$ - $m$ :  $n \cdot f_s \pm m \cdot f_b$ .

Параметры конструкции БСм РТД разделены на 3 группы: ВАХ НЭ, параметры топологии

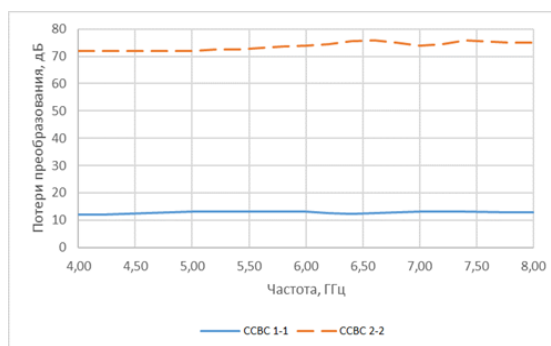


Рис. 2. Номинальные значения потерь преобразования ССВС 1-1 и 2-2 исследуемого широкополосного БСм РТД.

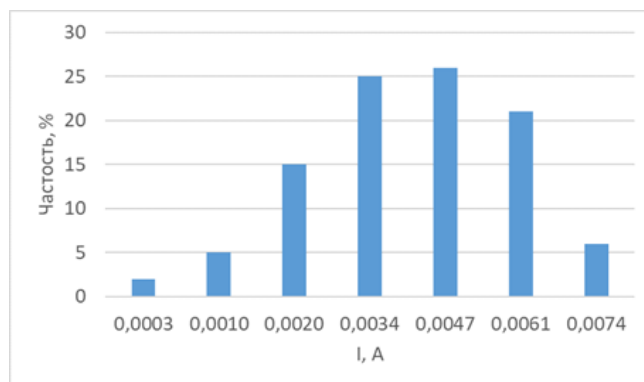
БСм и параметры подложки. Распределения всех параметров подчиняются нормальному закону. Разброс ВАХ НЭ обусловлен совместным влиянием технологических разбросов параметров конструкции НЭ: толщин и химического состава приконтактных областей и резонансно-туннельной структуры (РТС) РТД, площади мезы, а также удельного контактного сопротивления и площади омических контактов диода. К параметрам топологии БСм относятся размеры (длина и ширина) микрополосковых линий передачи. Допуск на эти параметры составляет  $\pm 12$  мкм. Под параметрами подложки понимаются ее толщина и относительная диэлектрическая проницаемость. Подложка считается изготовленной из поликора и имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $9.8 \pm 0.1$  Ф/м и толщину  $1 \pm 0.03$  мм. Поскольку в современных САПР микроэлектроники отсутствуют модели РТД, позволяющие рассчитать ВАХ диода, основываясь на параметрах его конструкции, авторами разработан программный комплекс моделирования начального участка ВАХ РТД с возможностью моделирования кинетики ВАХ диода в заданных условиях эксплуатации и проведения компьютерного статистического эксперимента по исследованию влияния технологических разбросов параметров конструкции РТД на распределение ВАХ партии диодов [15]. Для проведения исследования смоделирована выборка из 100 диодов (значения предельных отклонений параметров конструкции РТД представлены в **Таблице 1**, распределение тока в рабочей точке (1.36 В) – на **рис. 3**).

Для оценки влияния технологических разбросов различных групп параметров конструкции БСм РТД на распределение его электрических характеристик смоделировано несколько выборок БСм РТД (размер каждой выборки – 100 устройств). В первой варьировались

**Таблица 1.**

Значения предельных отклонений параметров конструкции РТД.

Параметр	Предельное отклонение
Толщина спейсеров, барьеров, ямы	$\pm 1$ МС
Доля Al в барьерах, спейсерах	$\pm 1$ %
Удельное сопротивление омических контактов	$\pm 0.25$ мкОм*см <sup>2</sup> (номинальное значение – 1 мкОм*см <sup>2</sup> )
Диаметр мезы	$\pm 2$ мкм (номинальное значение 20 мкм)



**Рис. 3.** Распределение тока в рабочей точке ВАХ РТД.

только параметры конструкции РТД, тогда как параметры топологии и подложки считались неизменными и равными номинальным значениям. Во второй варьировались длины и ширины микрополосковых линий передачи, в третьей – толщина подложки, в четвертой – её относительная диэлектрическая проницаемость. Наконец, пятая выборка смоделирована при совместном влиянии технологических разбросов всех перечисленных параметров.

Смоделированные распределения электрических характеристик для случая совместного воздействия технологических разбросов всех рассматриваемых параметров приведены на **рис. 4a, b**, параметры распределений представлены в **Таблице 2**. Величину дисперсий распределений электрических характеристик под раздельным влиянием технологических разбросов различных групп параметров конструкции БСм РТД можно оценить исходя из Табл. 2 и вкладов разбросов соответствующих параметров конструкции БСм в суммарную дисперсию (**рис. 5, 6**).

Для ранжирования вкладов технологических разбросов рассматриваемых параметров смесителя в разброс его электрических характеристик

**Таблица 2.**

Параметры смоделированных распределений электрических характеристик смесителя при совместном варьировании ВАХ НЭ, толщины и относительной диэлектрической проницаемости подложки и размеров микрополосковых линий передачи.

Электрическая характеристика	Среднее значение, дБ	Среднеквадратическое отклонение, дБ	Дисперсия, дБ <sup>2</sup>
Потери преобразования ССВС 1-1	13.38	0.6619	0.4382
Потери преобразования ССВС 2-2	79.59	5.3498	28.6201

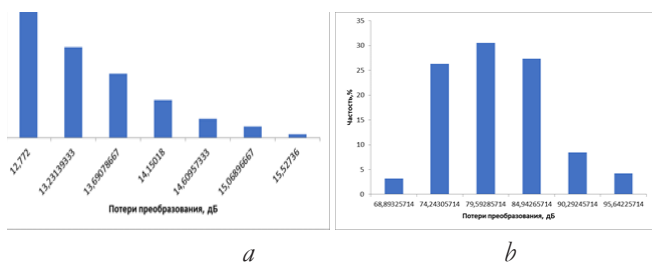


Рис. 4. Смоделированные распределения потерь преобразования ССВС 1-1 (а) и 2-2 (б) на частоте 7,5 ГГц под совместным влиянием разбросов ВАХ НЭ, толщины и относительной диэлектрической проницаемости подложки и размеров микрополосковых линий передачи

построены диаграммы, отражающие вклад каждого разброса в суммарную дисперсию. Вклады технологических разбросов оцениваются по отношению дисперсии распределений электрических характеристик под действием разброса каждого фактора в отдельности к дисперсии распределений соответствующих электрических характеристик под совместным влиянием технологических разбросов всех факторов (рис. 5, 6).

Анализ влияния технологических разбросов различных групп параметров конструкции БСм (размеров микрополосковых линий передачи, толщины и диэлектрической проницаемости подложки) и его НЭ показал, что наибольший вклад в суммарный разброс электрических характеристик смесителя вносит технологический разброс ВАХ РТД – дисперсия электрических характеристик БСм под влиянием технологического разброса ВАХ НЭ составляет 91% от суммарной (рис. 5, 6). В свою очередь, разброс ВАХ РТД вызван влиянием технологических разбросов параметров конструкции диода – толщин и химического

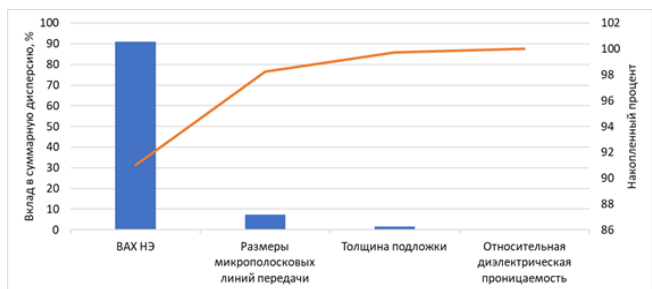


Рис. 5. Вклады дисперсий распределений потерь преобразования ССВС 1-1 под действием технологических разбросов различных параметров смесителя частот в суммарную дисперсию.

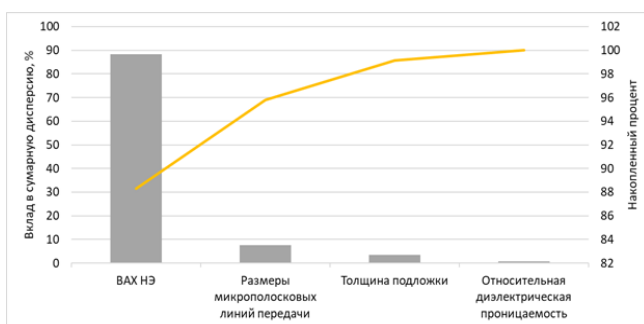
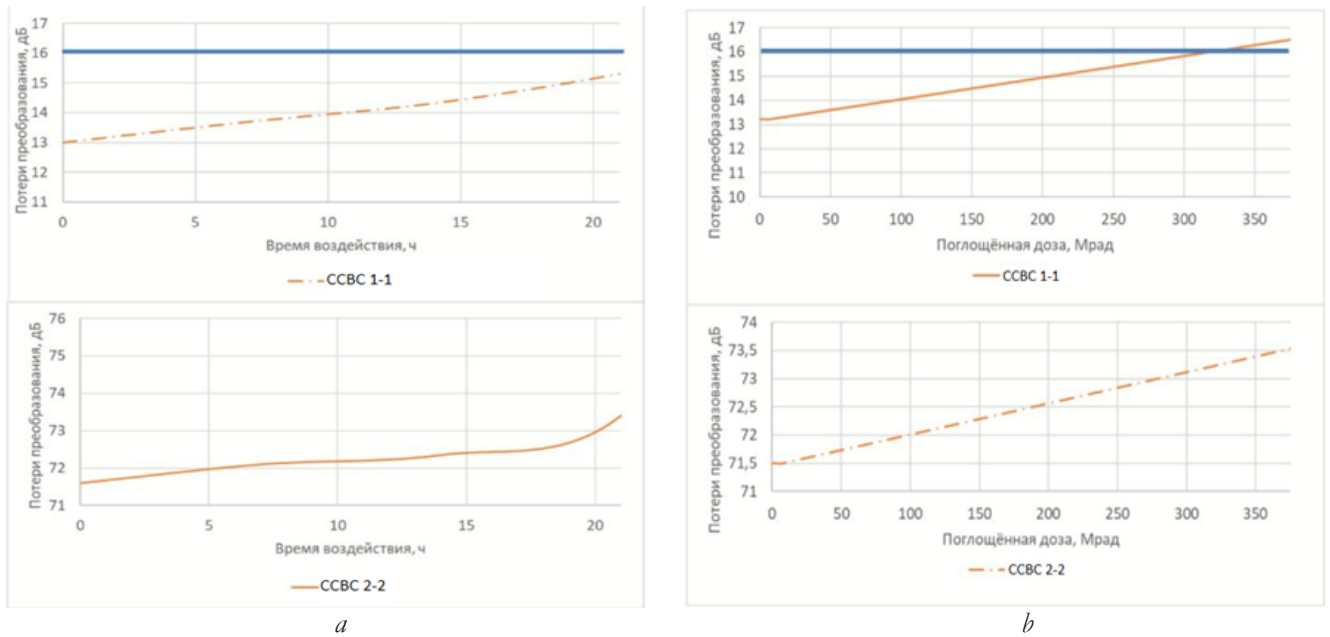


Рис. 6. Вклады дисперсий распределений потерь преобразования ССВС 2-2 под действием технологических разбросов различных параметров смесителя частот в суммарную дисперсию.

состава слоев РТС, площади мезы и параметров омических контактов диода. Таким образом, можно заключить, что технологический разброс ВАХ НЭ является доминирующим фактором, определяющим параметры распределения электрических характеристик БСм. Полученные распределения электрических характеристик при совместном влиянии технологических разбросов всех параметров конструкции необходимы для анализа надёжности смесителя.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БСМ НА БАЗЕ РТД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для нелинейных элементов смоделировано воздействие температуры 250°C в течение 21 ч и дозы гамма-излучения 375.1 Мрад. В качестве исходной ВАХ в обоих случаях используется результат измерений ВАХ РТД данного типа, моделирование деградации проводилось посредством разработанного авторами программного комплекса с помощью моделей, описанных в [7,11-12]. Полученные ВАХ подставлены в модель исследуемого смесителя в САПР AWR Microwave Office в виде аппроксимированных полиномиальных зависимостей тока от напряжения. На основе результатов моделирования электрических характеристик исследуемого смесителя построена их кинетика в условиях воздействия повышенной температуры и ИИ на частоте сигнала 7.5 ГГц (рис. 7а,б). При анализе результатов считается, что отказ наступает при выполнении хотя бы одного из следующих условий: потери преобразования ССВС 1-1 превышают 16 дБ; потери ССВС 2-2 становятся меньше 6б дБ.

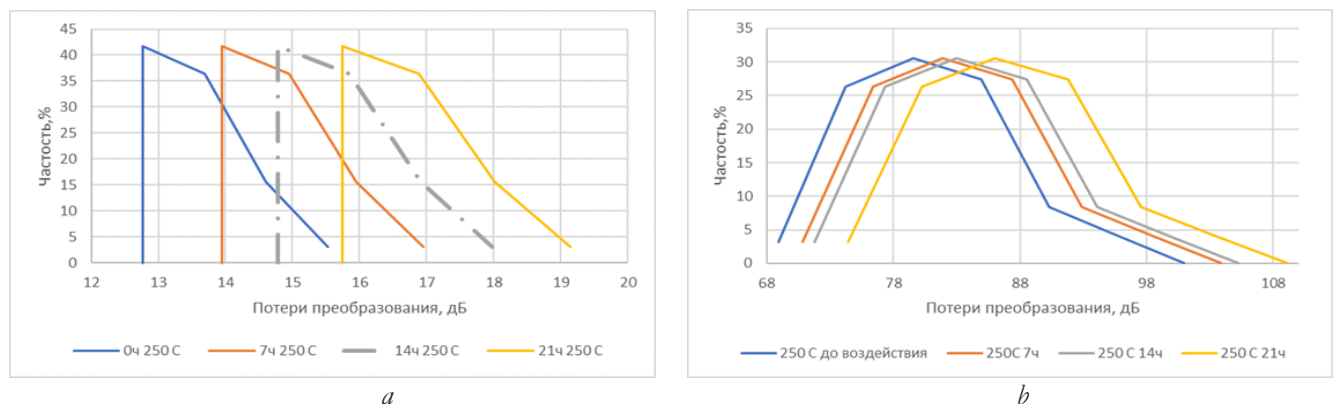


**Рис. 7.** Кинетика потерь преобразования ССВС 1-1 и 2-2 БСМ РТД на частоте 7,5 ГГц: (а) в условиях воздействия температуры 250 С; (б) в условиях воздействия поглощенной дозы гамма-излучения.

Как видно из приведенных графиков, для потерь преобразования ССВС 1-1 и 2-2 кинетика имеет монотонно растущий характер как в условиях воздействия повышенной температуры, так и в случае воздействия ИИ. Горизонтальными прямыми обозначены пороговые значения, при выходе за которые фиксируется отказ. Пороговые значения для потерь ССВС 2-2 не входят в область построения графика, т.к. являются ограничениями снизу, а потери преобразования монотонно растут под действием дестабилизирующих факторов. Таким образом, отказ возможен только по причине превышения потерями преобразования ССВС 1-1 порогового значения. В случае воздействия ИИ отказу соответствует поглощенная доза в 325 Мрад. Отказ в условиях воздействия повышенной температуры на

рассматриваемом промежутке времени не зафиксирован, путем экстраполяции уравнения кривой, описывающей кинетику потерь преобразования ССВС 1-1 установлено, что отказу по данному критерию соответствует 25 ч воздействия температуры 250°С.

На основе полученной для одиночного БСМ кинетики электрических характеристик в заданных условиях эксплуатации (рис. 7а,б) и полученных в результате предыдущего исследования распределений этих характеристик под влиянием технологических разбросов параметров конструкции БСМ (рис. 4а,б) построена кинетика распределений электрических характеристик БСМ в заданных условиях эксплуатации (рис. 8, 9а,б).



**Рис. 8.** Групповая кинетика потерь преобразования ССВС 1-1 и 2-2 БСМ РТД на частоте 7,5 ГГц в условиях воздействия температуры 250 С: (а) ССВС 1-1; (б) ССВС 2-2.

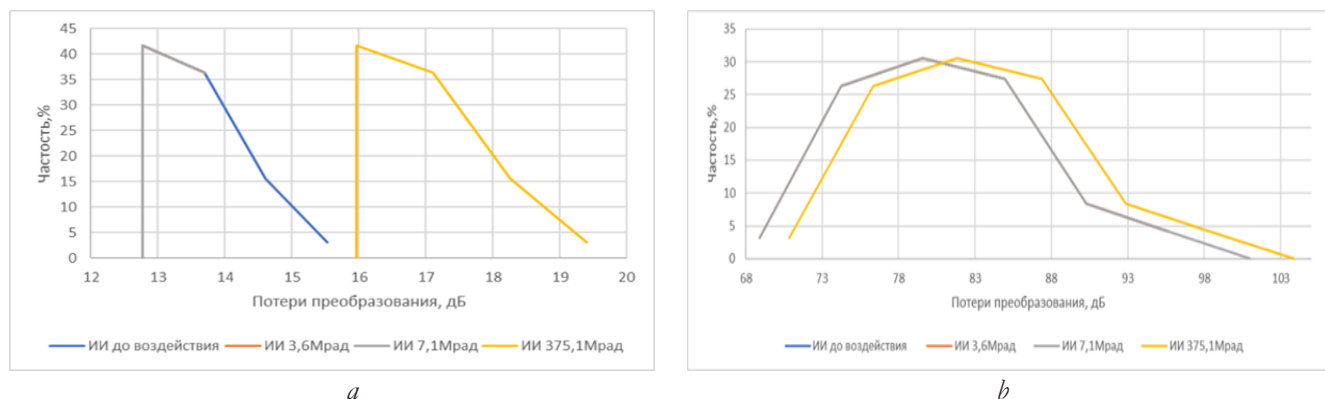


Рис. 9. Групповая кинетика потерь преобразования ССВС 1-1 и 2-2 БСм РТД на частоте 7,5 ГГц в условиях воздействия гамма-излучения: (а) ССВС 1-1; (б) ССВС 2-2.

Для получения гамма-процентной наработки до отказа при  $\gamma = 0.99$ , соответствующей реальным условиям эксплуатации, выполнен пересчёт полученных значений в наработку до отказа в реальных условиях эксплуатации по описанной в [7,11-12] методике. Рассматриваемый БСм рассчитан на применение в составе бортовой аппаратуры космического аппарата (КА), находящегося на околоземной орбите: для данных условий эксплуатации характерно воздействие температур до  $+200^{\circ}\text{C}$  и дозовой нагрузки до 30 крад/год (согласно [8-9,17]), поглощённая доза для бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА), находящейся за массовой защитой величиной  $1...2 \text{ г/см}^2$  (что соответствует типовым значениям для материалов защит, применяемых в КА), составляет  $10...30 \text{ крад/год}$ ).

Анализ полученных результатов показал, что применение РТД в качестве НЭ исследуемого БСм не обеспечивает достаточной надёжности смесителя при эксплуатации в условиях воздействия повышенной температуры - гамма-процентная наработка  $t_{\gamma} = 0.99$  в условиях воздействия температуры до  $200^{\circ}\text{C}$  не превышает 6.5 лет. Таким образом, представляется перспективной разработка алгоритмов конструкторско-технологической оптимизации и реализующего их программного комплекса, с помощью которого было бы возможно повышение надёжности смесителя.

Для оценки гамма-процентной наработки до отказа исследуемого БСм в условиях воздействия гамма-излучения выполнен пересчёт поглощенной дозы, приводящей к отказу, во время эксплуатации. Гамма-процентная наработка при  $t_{\gamma} = 0.99$  превышает 25 лет, что

свидетельствует о высокой надёжности данного БСм в условиях воздействия гамма-излучения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика, позволяющая оценивать надёжность ПЧ радиосигналов на базе РТД по постепенным отказам в заданных условиях эксплуатации расчётными методами с учетом влияния технологических разбросов параметров конструкции ПЧ на разброс его электрических характеристик.

Выполнен анализ влияния технологических разбросов различных групп параметров конструкции широкополосного БСм на основе РТД на распределение его электрических характеристик. Получены распределения электрических характеристик БСм под действием технологических разбросов ВАХ РТД, параметров топологии БСм, РТД и подложки, а также при совместном влиянии всех перечисленных факторов. Установлено, что наибольший вклад в разброс электрических характеристик смесителя вносит технологический разброс ВАХ РТД смесителя.

Проведен анализ кинетики электрических характеристик широкополосного балансного смесителя частот СВЧ радиосигналов на базе РТД в условиях воздействия повышенной температуры и гамма-излучения. Получена кинетика электрических характеристик смесителя. Установлено, что отказ происходит в результате роста потерь преобразования смесителя. Получены оценки гамма-процентной наработки до отказа, соответствующие условиям эксплуатации смесителя в составе бортовой аппаратуры КА, находящегося на околоземной орбите. Исследуемый смеситель не обеспечивает достаточной надёжности при

эксплуатации в условиях воздействия повышенной температуры. Для повышения надёжности БСМ в процессе эксплуатации в условиях воздействия данного фактора представляется перспективным проведение конструкторско-технологической оптимизации электрических характеристик смесителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Diebold S, Tsuruda K, Kim J-Y, Mukai T, Fujita M, Nagatsuma T. A terahertz monolithic integrated resonant tunneling diode oscillator and mixer circuit. *Proc. of SPIE 9856, Terahertz Physics, Devices, and Systems X: Advanced Applications in Industry and Defense (Baltimore)*, 2016, vol. 9856 (Washington: SPIE), 98560U.
2. Hori T, Ozono T, Orihashi N, Asada M. Frequency mixing characteristics of room temperature resonant tunneling diodes at 100 and 200 GHz. *Journal of applied physics*, 2006, 99(6):064508-064508-7.
3. Kanaya H, Shibayama H, Suzuki S and Asada M. Fundamental Oscillation up to 1.31 THz in Resonant Tunneling Diodes with Thin Well and Barriers. *Applied Physics Express*, 2012, 5:124101
4. Mizuta H and Tanoue T. High-speed and functional applications of resonant tunnelling diodes. In: *The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes*. N.Y., Cambridge univ. press, p. 133.
5. Meshkov SA. Methodology for consideration of technological and operational factors in design of micro- and nanodevices. *J. of Instr. Eng.*, 2019, 62:921-928.
6. Srivastava A. Microfabricated Terahertz Vacuum Electron Devices: Technology, Capabilities and Performance Overview. *Europ. J. of Advances in Engineering and Technology*, 2015, 2(8):54-64.
7. Makeev MO, Meshkov SA and Cherkasov KV. Modeling of Resonant-Tunneling Diodes I-V Characteristics' Kinetics Under Destabilizing Factors' Influence During Operation. *Proc. Int. Russ. Automation Conf.*, 2019, p. 8867795.
8. Cloudsley M, Wilson J, Shinn J, Badavi F, Heinbockel J, Atwell W. Neutron Environment Calculations for Low Earth Orbit. *SAE Technical Papers*, 2001, 01ICES-2327.
9. Ravinarayana B. New Radiation Dose Model for Geostationary Orbit.. *J. of Spacecraft and Rocket*, 2009, 46(3):712-715.
10. Maekawa T, Kanaya H, Suzuki S and Asada M. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss. *Applied Physics Express*, 2016, 9:024101.
11. Makeev MO, Sinyakin VYu and Meshkov SA. Reliability prediction of resonant tunneling diodes and non-linear radio signal converters based on them under influence of temperature factor and ionizing radiations. *Adv. in Astronautical Sci.*, 2018, 170:655-665.
12. Makeev MO, Meshkov SA, Sinyakin VYu, Ivanov YuA and Razoumny YuN. Reliability prediction of RFID passive tags power supply systems based on RTD under given operating conditions. *Adv. in Astronautical Sci.*, 2017, 161:475-483.
13. Wang J, Al-Khalidi A, Zhang C, Ofiare A, Wang L, Wasige E and Figueiredo JML. Resonant Tunneling Diode as High Speed Optical/Electronic Transmitter. In: *10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*, Liverpool, UK, 11-13 Sept 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/UCMMT.2017.8068497.
14. Sinyakin VYu, Makeev MO and Meshkov SA. RTD application in low power UHF rectifiers. *J. of Physics: Conference Series*, 2016, 741: 012160.
15. Ivanov YuA, Meshkov SA, Fedorenko IA, Fedorkova NV, Shashurin VD Subharmonic mixer with improved intermodulation characteristics based on a resonant tunnel diode. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2010, 55:921-927.
16. Nagatsuma T, Fujita M, Kaku A, Tsuji D, Nakai S, Tsuruda K, Mukai T. Terahertz Wireless Communications Using Resonant Tunneling Diodes as Transmitters and Receivers. *Proc. of Intern. Conf. on Telecommunications and Remote Sensing (Luxembourg)*, 2014, 1:41-46.
17. Ravinarayana B, Upadhyaya N, Kulkarni R. Total radiation dose at geostationary orbit. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 52(2): 530-534.

#### Черкасов Кирилл Вячеславович

инженер

МГТУ им. Н.Э. Баумана

5/1, 2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия

kvche@mail.ru

#### Романов Иван Александрович

инженер

ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга

Москва 107078, Россия

musicfox@yandex.ru

#### Мешков Сергей Анатольевич

к.т.н., доцент

МГТУ им. Н.Э. Баумана

5/1, 2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия

sb67241@mail.ru

#### Щапури Василий Дмитриевич

д.т.н., проф.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

5/1, 2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия

schashurin@bmstu.ru