

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНОГО БАЛАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

© 2022 г. К. В. Черкасов^а, *, С. А. Мешков^а, М. О. Макеев^а, В. Д. Шашурин^а

^аМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005 Российская Федерация

*E-mail: kvche@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 27.09.2021 г.

Предложено решение задачи конструкторско-технологической оптимизации (К-ТО) электрических характеристик нелинейных преобразователей частоты (ПЧ) СВЧ-радиосигналов на базе резонансно-туннельных диодов (РТД) для обеспечения надежности в заданных условиях эксплуатации. Разработан программный комплекс, позволяющий выполнять анализ надежности ПЧ СВЧ-радиосигналов на базе РТД и проводить К-ТО электрических характеристик ПЧ с целью обеспечения надежности в заданных условиях эксплуатации. Проведена апробация разработанного программного комплекса на примере широкополосного балансного смесителя СВЧ-радиосигналов на базе РТД. Показано, что в результате оптимизации электрических характеристик рассматриваемого смесителя гамма-процентный ресурс может быть увеличен в 7.5 раз, что доказывает перспективность конструкторско-технологической оптимизации для решения задачи обеспечения надежности ПЧ радиосигналов на базе РТД.

DOI: 10.31857/S0033849422060079

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные преобразователи частоты (ПЧ) радиосигналов являются ключевыми элементами радиотехнических систем, так как с их помощью осуществляются основные радиотехнические преобразования. 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 [1]. Применение РТД в качестве нелинейных элементов (НЭ) ПЧ радиосигналов позволяет расширить рабочий диапазон частот и повысить их помехоустойчивость [2–10]. Производство РТД возможно с использованием отработанных технологий микроэлектроники.

При проектировании ПЧ радиосигналов помимо обеспечения заданных электрических характеристик приоритетной является задача обеспечения надежности в заданных условиях эксплуатации. Одним из путей решения задачи обеспечения надежности ПЧ радиосигналов на базе РТД в задан-

ных условиях эксплуатации является изложенная в [11] методология проектирования микро- и наноприборов, которая предусматривает введение этапа конструкторско-технологической оптимизации (К-ТО), позволяющего определить номинальные значения параметров конструкции прибора и его электрических характеристик, максимизирующие заданную целевую функцию, при этом оставляя неизменными технологические допуски на параметры конструкции и задаваемые конструктором допуски на электрические характеристики оптимизируемого прибора.

Цель данной работы – рассмотреть методику и алгоритм К-ТО электрических характеристик ПЧ радиосигналов на базе РТД, провести апробацию разработанного авторами программного комплекса, позволяющего осуществлять анализ надежности ПЧ расчетными методами и проводить конструкторско-технологическую оптимизацию электрических характеристик ПЧ радиосигналов на базе РТД в заданных условиях эксплуатации.

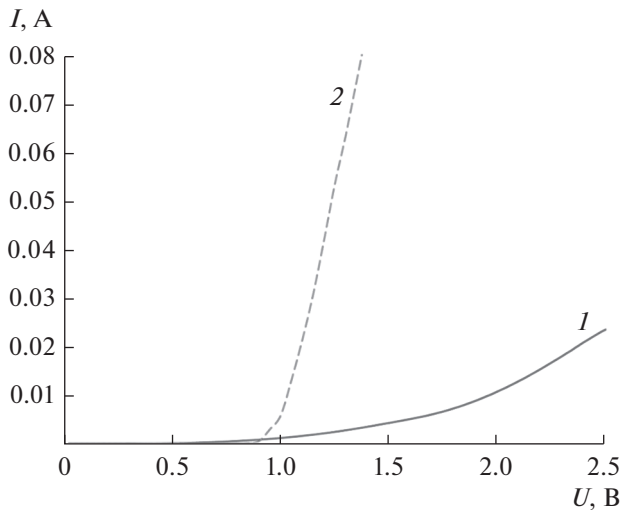


Рис. 1. Начальный участок ВАХ РТД (1) и ДБШ (2).

1. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Объектом исследования является широкополосный балансный смеситель частот (БС) диапазона 4...8 ГГц на базе РТД, выполненный в виде гибридной интегральной схемы. Начальный участок вольт-амперной характеристики (ВАХ) РТД приведен на рис. 1, резонансно-туннельная структура диода состоит из двух AlAs-барьеров и располагающейся между ними GaAs-квантовой ямы. Моделирование электрических характеристик смесителя проводится в системе автоматизированного проектирования (САПР) AWR Microwave Office, схема смесителя в данной САПР представлена на рис. 2а, 2б. Номера на рис. 2б соответствуют номерам портов на рис. 2а.

Оптимизация электрических характеристик ПЧ радиосигналов достигается за счет измене-

ния номинальных значений параметров конструкции.

В качестве целевой функции (ЦФ) вида $f(t, Y, \sigma, \Delta)$, где t – время эксплуатации прибора, Y – вектор его электрических характеристик, σ – вектор технологических разбросов параметров конструкции прибора, Δ – вектор допустимых отклонений (допуски) электрических характеристик прибора, могут быть выбраны вероятность выполнения заданных функций партией приборов в течение определенного срока эксплуатации, вероятность попадания параметров в установленные допуски (вероятность выхода годных) P_T за время эксплуатации прибора и гамма-процентный ресурс T_γ в заданных условиях эксплуатации.

В качестве целевой функции нами был выбран гамма-процентный ресурс. В этом случае:

- 1) критерий оптимальности: $\max T_\gamma$;
- 2) управляемые параметры: вектор X номинальных значений параметров конструкции прибора;
- 3) ограничения: $\Delta = \text{const}$, $\sigma = \text{const}$, $X \in O_K$, $X \in O_T$, $P_T(t=0, Y, \sigma, \Delta) \geq P_T^{\min}$, где O_K , O_T – ограничения конструкторского и технологического характера, P_T^{\min} – минимально допустимое значение функции вероятности выхода годных после изготовления.

В результате решения задачи оптимизации получают новые значения номиналов $X_{\text{опт}}$ и $Y_{\text{опт}}$, которым соответствует максимум выбранной целевой функции. Устройство считается годным/работоспособным в момент времени t_i , если все электрические параметры Y одновременно попадают в соответствующие допуски.

Данный подход предполагает использование методов имитационного, в том числе вероятностного, моделирования электрических характеристик прибора, закономерностей их деградации в заданных условиях эксплуатации, а также технологиче-

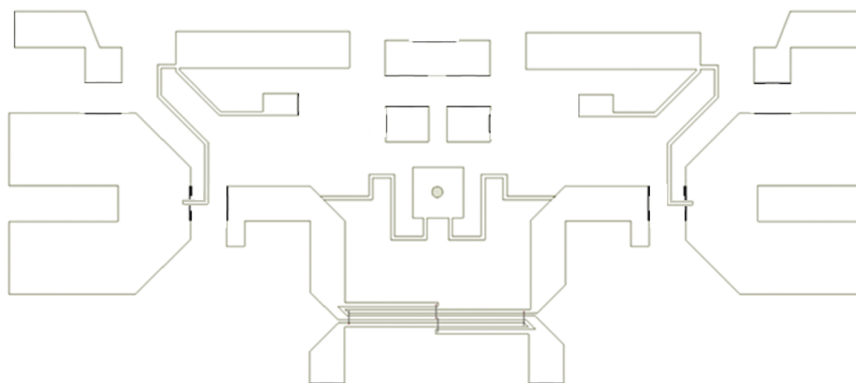


Рис. 2. Топология широкополосного балансного смесителя в САПР AWR Microwave Office.

ских погрешностей и основывается на результатах исследований процессов деградации элементов прибора в условиях воздействия внешних факторов.

Большинство современных САПР, используемых при проектировании микроэлектронных устройств, имеют в своем составе специализированные модули, позволяющие автоматизировать процесс оптимизации электрических характеристик проектируемых устройств. Необходимым условием для проведения такой оптимизации является наличие в САПР математических моделей, связывающих параметры конструкции с электрическими характеристиками, для всех элементов, входящих в состав рассматриваемого устройства. Поскольку НЭ БС в исследуемом смесителе являются РТД, математические модели которых отсутствуют в САПР, задача оптимизации не может быть решена их средствами. Поэтому нами разработан программный модуль, позволяющий производить оптимизацию электрических характеристик микроэлектронных устройств, в состав которых входят элементы наноэлектроники. В данной работе этот модуль используется для моделирования БС с РТД в качестве НЭ, но он может быть использован для оптимизации электрических характеристик других микроэлектронных устройств.

Основной идеей алгоритма работы описываемого модуля является разделение процесса оптимизации на несколько независимых этапов, последовательно связанных друг с другом: результаты каждого этапа являются входными параметрами следующего. Таким образом, решение задачи оптимизации, которую можно записать в виде

$$\text{ЦФ}(t, Y_{\text{опт}}, \sigma, \Delta) = \max(\text{ЦФ}(t, Y, \sigma, \Delta)),$$

где $Y_{\text{опт}} = Y(X_{\text{БС, опт}}, X_{\text{РТД, опт}})$, $\Delta = \text{const}$, $\sigma = \text{const}$, $X_{\text{БС, РТД}} \in O_k$, $X_{\text{БС, РТД}} \in O_t$, $P_t(t=0, Y, \sigma, \Delta) \geq P_t^{\text{мин}}$, $X_{\text{БС}}$ – вектор параметров конструкции оптимизируемого устройства, $X_{\text{РТД}}$ – вектор параметров конструкции РТД, сводится к последовательному выполнению следующих этапов.

1. Поиск такого целевого сочетания электрических характеристик оптимизируемого прибора $Y_{\text{ц}}$, которое обеспечивает решение задачи оптимизации $\text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц}}, \sigma, \Delta) = \max(\text{ЦФ}(t, Y, \sigma, \Delta))$.

2. Поиск такого сочетания параметров конструкции оптимизируемого прибора (в данном случае смесителя частот) $X_{\text{ц, БС}}$ и коэффициентов полинома, описывающего форму ВАХ НЭ прибора $X_{\text{ц, ВАХ}}$, которое обеспечивает максимально близкие к целевым значения электрических характеристик

$$|Y_{\text{ц}} - Y_{\text{ц, ВАХ}}| = \min(|Y_{\text{ц}} - Y(X_{\text{БС}}, X_{\text{ВАХ}})|),$$

$$Y_{\text{ц, ВАХ}} = Y(X_{\text{ц, БС}}, X_{\text{ц, ВАХ}}).$$

При выполнении данного условия транзитивно обеспечивается выполнение условия

$$|\text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц}}, \sigma, \Delta) - \text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц, ВАХ}}, \sigma, \Delta)| = \\ = \min(|\text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц}}, \sigma, \Delta) - \text{ЦФ}(t, Y(X_{\text{БС}}, X_{\text{ВАХ}}), \sigma, \Delta)|),$$

т.е. $\text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц}}, \sigma, \Delta) \approx \text{ЦФ}(t, Y_{\text{ц, ВАХ}}, \sigma, \Delta)$ с точностью до приведенной выше разности.

3. Поиск сочетания параметров конструкции оптимизируемого устройства $X_{\text{БС, опт}}$ и его нелинейного элемента $X_{\text{РТД, опт}}$, при которых электрические характеристики прибора $Y_{\text{опт}}$ максимально близки к $Y_{\text{ц, ВАХ}} = Y(X_{\text{ц, БС}}, X_{\text{ц, ВАХ}})$, а следовательно, и к $Y_{\text{ц}}$:

$$|Y(X_{\text{ц, БС}}, X_{\text{ц, ВАХ}}) - Y(X_{\text{БС, опт}}, X_{\text{РТД, опт}})| = \\ = \min(|Y(X_{\text{ц, БС}}, X_{\text{ц, ВАХ}}) - Y(X_{\text{БС}}, X_{\text{РТД}})|),$$

т.е. $Y(X_{\text{БС, опт}}, X_{\text{РТД, опт}}) \approx Y(X_{\text{ц, БС}}, X_{\text{ц, ВАХ}}) \approx Y_{\text{ц}}$.

4. Проверка полученного решения.

На этапе 1 оптимизируемое устройство моделируется как “черный ящик”, обладающий рядом электрических характеристик Y , которые являются управляемыми параметрами на данном этапе. Перед началом этапа 1 необходимо выбрать ЦФ , по которой будет проводиться оптимизация (в рассматриваемом случае T_γ при $\gamma = 0.99$), сформулировать количественные критерии годности Y_t для электрических характеристик прибора (задать допуски Δ для всех элементов Y), а также задать коэффициенты полиномов, описывающих кинетику Y в заданных условиях эксплуатации. Зависимость задается в виде функции $y(t, A)$, $y(0, A) = Y_0$, где t – параметр, прямо или косвенно характеризующий длительность воздействия дестабилизирующего фактора, Y_0 – значение электрической характеристики до воздействия дестабилизирующего фактора, A – величина воздействия эксплуатационного фактора.

Далее строится групповая кинетика каждой электрической характеристики в условиях воздействия указанного фактора с учетом влияния технологических разбросов параметров конструкции прибора. Под групповой кинетикой понимается кинетика статистического распределения электрической характеристики, получаемого посредством компьютерного статистического эксперимента, учитывающего влияние технологических разбросов параметров конструкции прибора на его электрические характеристики. На основании полученной групповой кинетики для каждой электрической характеристики определяется новое номинальное значение, затем вычисляется значение ЦФ для нового и старого номиналов (в случае нового номинала распределение сдвигается на величину $dY = Y_{\text{нов}} - Y_{\text{стар}}$). Процесс повторяется до тех пор, пока приращение ЦФ для очередного $Y_{\text{нов}}$ по сравнению с предыдущим значением

не станет меньше некоторого предельного значения ϵ_{ps} . Результатом работы данного этапа является вектор целевых значений электрических характеристик $Y_{ц}$.

Этап 2 оптимизации заключается в подборе формы ВАХ НЭ и параметров конструкции ПЧ, обеспечивающей максимально близкие к $Y_{ц}$ значения электрических характеристик, что предполагает моделирование оптимизируемого устройства с учетом параметров конструкции ПЧ X_{BC} за исключением параметров конструкции НЭ – на данном этапе они понимаются как нелинейные сопротивления, ВАХ которых задается некоторой функцией. Исходными данными на этапе 2 являются: полученный на этапе 1 вектор $Y_{ц}$; вектор параметров конструкции устройства X_{BC} ; вектор технологических разбросов параметров конструкции устройства σ_{sigma} ; вектор параметров полинома ВАХ НЭ $X_{ВАХ}$. ЦФ оптимизации на этапе 2 может быть представлена как $\min(|Y_{ц} - Y_{ВАХ}|)$, где $Y_{ВАХ} = Y(X_{BC}, X_{ВАХ})$ – вектор электрических характеристик, полученный на текущей итерации оптимизации. Управляемыми параметрами являются $X_{ВАХ}$ и X_{BC} , причем параметры конструкции БС оптимизируются средствами используемого САПР (в описываемом случае – AWR Microwave Office) под каждую из получаемых конфигураций $X_{ВАХ}$ отдельно с целью обеспечения согласования волновых сопротивлений диодных секций ПЧ с сопротивлениями НЭ. Результатом этапа 2 оптимизации является пара векторов $X_{ц,ВАХ}$ и $X_{ц,BC}$, содержащие коэффициенты полинома ВАХ и параметры конструкции оптимизируемого ПЧ, при которых достигается максимальное приближение к целевым значениям электрических характеристик.

Завершающим этапом цикла оптимизации является определение параметров конструкции НЭ, обеспечивающих наиболее близкую к целевой форму ВАХ. Поскольку математические модели, позволяющие проводить подобную оптимизацию конструкции РТД, в открытом доступе отсутствуют, для этих целей нами был разработан дополнительный модуль к программному комплексу RTSVAC. В качестве метода оптимизации ВАХ РТД используется покоординатный спуск. ЦФ на данном этапе – $\min(R^2)$, где R^2 – средний квадрат разности между полиномиально заданной и смоделированной по $X_{РТД}$ ВАХ. Управляемыми параметрами являются параметры конструкции РТД $X_{РТД}$, в качестве начальных значений $X_{РТД}$ принимаются параметры конструкции НЭ ПЧ, при которых были получены исходные (до начала оптимизации) значения Y . Как и на предыдущем этапе, параметры $X_{ПЧ}$ варьируются с целью обеспечения согласования волновых сопротивлений диодных секций ПЧ с сопротивлениями НЭ ПЧ. Результатом работы этапа 3 оптимизации являются векторы

$X_{РТД, \text{опт}}$, $X_{BC, \text{опт}}$ и $Y_{\text{опт}}$, содержащие оптимальные параметры конструкции РТД, ПЧ и оптимальные значения электрических характеристик ПЧ, обеспечивающие максимум выбранной в начале оптимизации ЦФ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации описанной выше методики нами был разработан программный комплекс, позволяющий проводить конструкторско-технологическую оптимизацию ПЧ радиосигналов на базе РТД. Для моделирования электрических характеристик ПЧ и учета влияния технологических разбросов параметров конструкции ПЧ на разброс этих характеристик использован САПР AWR Microwave Office. Для моделирования ВАХ РТД, ее кинетики в условиях воздействия дестабилизирующих факторов с учетом влияния технологических разбросов параметров конструкции диода нами разработан соответствующий программный комплекс на основе алгоритмов высокоскоростного моделирования начального участка ВАХ РТД, реализованных в [12]. Помимо алгоритмов моделирования ВАХ в данном комплексе реализованы алгоритмы оптимизации ее формы путем подбора параметров конструкции РТД, обеспечивающих наиболее близкую к заданному полиному форму ВАХ диода. Смоделированные в данном комплексе ВАХ аппроксимируются полиномами и подставляются в модель ПЧ в САПР Microwave Office для получения электрических характеристик ПЧ. Параметры деградационных процессов, происходящих в структуре РТД в условиях воздействия температурного фактора и ионизирующих излучения и приводящих к дрейфу ВАХ, определены в ходе проведения экспериментальных исследований [13–16].

Рассматриваемый ПЧ рассчитывали на условия эксплуатации в составе бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов (КА), находящихся на околоземной орбите. Таким условиям эксплуатации соответствует воздействие дозы гамма-излучения мощностью до 30 крад/год (характерное значение для бортовой аппаратуры КА, находящейся за массовой защитой величиной $1...2 \text{ г/см}^2$ (что соответствует типовым значениям для материалов защит, применяемых в КА), согласно [17–21]) и повышенной температуры до 200°C .

В качестве электрических характеристик оптимизируемого БС РТД рассматривали потери преобразования комбинационных частот (КЧ) 1-1 (первая цифра – номер гармоники сигнала, вторая – номер гармоники гетеродина) и 2-2. В качестве критериев годности на основании представленных разработчиком требований выбраны следующие: поте-

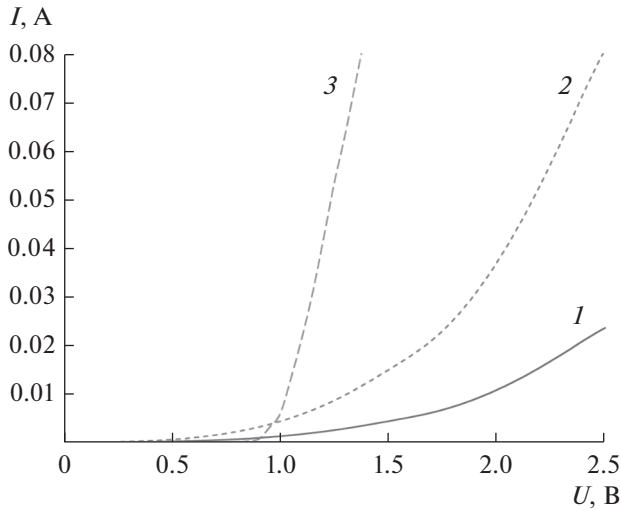


Рис. 3. Номинальная (1) и оптимальная (2) формы начального участка ВАХ НЭ оптимизируемого смесителя на основе РТД и начальный участок ВАХ ДБШ (3).

при преобразования КЧ 1-1 не более 16 дБ; потери преобразования КЧ 2-2 не менее 66 дБ.

Анализ надежности БС показал, что наиболее опасной с точки зрения возникновения отказов является частота сигнала 7.5 ГГц, так как потери преобразования КЧ 1-1 на данной частоте наиболее близки к пороговому значению, а сами отказы возникают в результате роста потерь преобразования КЧ 1-1, вызванного необратимыми процессами деградации НЭ в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Зависимость потерь преобразования КЧ 2-2 от длительности воздействия эксплуатационных факторов имеет монотонно растущий характер, что делает невозможным отказ БС из-за уменьшения потерь преобразования

КЧ 2-2. Установлено, что гамма-процентный ресурс исследуемого БС при $\gamma = 0.99$ ($t_{\gamma=0.99}$) в условиях воздействия гамма-излучения превышает 25 лет. В то же время $t_{\gamma=0.99}$ данного БС в условиях воздействия повышенной температуры не превышает 6.5 лет, что свидетельствует о необходимости проведения К-ТО его электрических характеристик с целью обеспечения надежности.

В результате оптимизации, проведенной посредством разработанного программного комплекса, подобраны параметры конструкции РТД (начальная и оптимизированная ВАХ приведены на рис. 3) и пассивных элементов БС, позволившие увеличить гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0.99$ $T_{\gamma=0.99}$ в условиях воздействия повышенной температуры в 7.5 раз (зависимость вероятности безотказной работы (ВБР) БС от наработки приведена на рис. 4). Оценка гамма-процентного ресурса получена из анализа графика зависимости ВБР смоделированной выборки из 100 БС от наработки в условиях воздействия повышенной температуры для температур эксплуатации 85 и 125°C. ВБР партии в момент времени t определяется как отношение числа отказавших приборов к размеру выборки. Отказ прибора фиксируется при выходе хотя бы одной из рассматриваемых электрических характеристик за пределы установленных допусков.

Для получения оптимальной формы ВАХ РТД ширина симметричных барьеров его двухбарьерной AlAs/GaAs резонансно-туннельной структуры (РТС) уменьшена в 2.5 раза по сравнению с исходной (с 2.83 до 1.13 нм), ширина ямы увеличена на 40% (с 2.83 до 3.96 нм), диаметр мезы — в 2.25 раза (с 20 до 45 мкм), химический состав слоев РТС не изменялся, параметры пассивных элементов БС были оптимизированы под новую форму ВАХ НЭ.

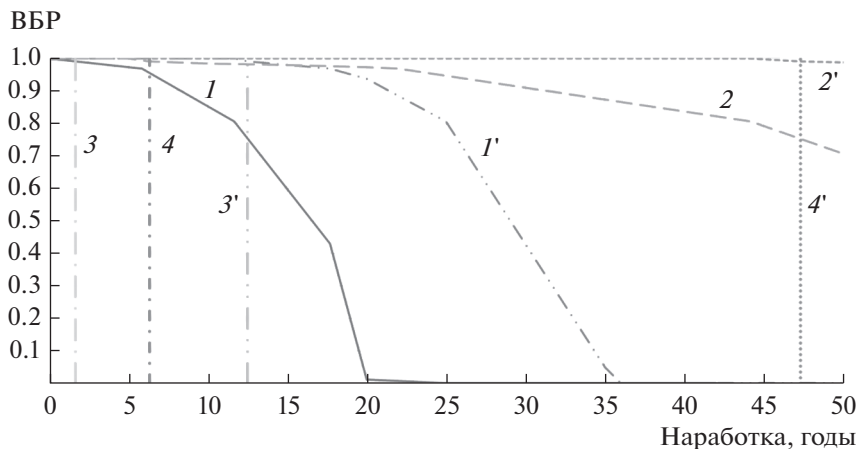


Рис. 4. Зависимость вероятности безотказной работы широкополосного балансного смесителя на основе РТД от времени до оптимизации (1–4) и после (1'–4'): ВБР при температуре эксплуатации 125 (1, 1') и 85°C (2, 2'); $t_{\gamma=0.99}$ при температуре эксплуатации 125 (3, 3') и 85°C (4, 4').

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация параметров конструкции РТД и топологии широкополосного БС посредством разработанного программного комплекса позволила увеличить $T_{\gamma=0,99}$ в условиях воздействия повышенной температуры в 7.5 раз. Это доказывает, что задачу обеспечения надежности прибора в заданных условиях эксплуатации возможно решить посредством К-ТО электрических характеристик ПЧ радиосигналов без изменения технологии их изготовления. Полученные результаты также демонстрируют перспективность дальнейших исследований в сфере применения РТД как НЭ ПЧ радиосигналов, поскольку проведенное исследование показало возможность обеспечить надежность ПЧ на базе РТД путем задействования основного преимущества РТД – возможности подбирать оптимальную для конкретного ПЧ форму ВАХ диода с помощью варьирования параметров конструкции диода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-37-90125/19).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mizuta H., Tanoue T. The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 133.
2. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Fedorenko I.A. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2010. V. 55. P. 921.
3. Sinyakin V.Yu., Makeev M.O., Meshkov S.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 741. № 1. P. 012160.

4. Wang J., Al-Khalidi A., Zhang C. et al. // Proc. 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Liverpool, 11–13 Sept. 2017. N.Y.: IEEE, 2014. P. 8068353.
5. Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A. et al. // Proc. Int. Conf. Telecommunications and Remote Sensing. Luxembourg. 26–27 Jun. 2014. Sophia: ICREST, 2014. P. 41.
6. Hori T., Ozono T., Orihashi N., Asada M. // Appl. Phys. 2006. V. 99. № 6. P. 064508.
7. Kanaya H., Shibayama H., Suzuki S., Asada M. // Appl. Phys. (Express). 2012. V. 5. № 12. P. 124101.
8. Maekawa T., Kanaya H., Suzuki S., Asada M. // Appl. Phys. (Express). 2016. V. 9. № 2. P. 024101.
9. Srivastava A. // Eur. J. Adv. in Engin. Technol. 2015. V. 2. № 8. P. 54.
10. Diebold S., Tsuruda K., Kim J.-Y. et al. // Procs. SPIE . 2016. Washington: SPIE. V. 9856. P. 98560U.
11. Meshkov S.A. // J. Instrumental Engineering. 2019. V. 62. P. 921.
12. Makeev M.O., Черкасов К.В., Иванов Ю.А., Мешков С.А. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 28.
13. Makeev M.O., Иванов Ю.А., Мешков С.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 1. С. 83.
14. Makeev M.O., Meshkov S.A., Ivanov Y.A. // Key Engineering Mater. 2017. V. 724. P. 48.
15. Makeev M.O., Meshkov S.A., Sinyakin V.Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. № 9. P. 092004.
16. Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A. // Adv. in Astronautical Sci. 2020. V. 170. P. 655.
17. Ravinarayana B., Upadhyaya N., Kulkarni R. // IEEE Trans. 2006. V. NS-52. № 2. P. 530.
18. Ravinarayana B. // J. Spacecraft and Rocket. 2009. V. 46. № 3. P. 712.
19. Cloudsley M., Wilson J., Shinn J. et al. // SAE Technical Papers. 2001. P. 01ICES-2327.
20. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. // Космич. исслед. 2016. Т. 54. № 6. С. 451.
21. Артюхова М.А. // Тр. Междунар. симп. “Надежность и качество”, Пенза, 27 мая–3 июня 2013 г. Пенза: Изд. ПГУ, 2013. № 2. С. 9.