

РАДИОФИЗИКА/RADIOPHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110> EDN: VASMAI

1/F-ШУМ ПРИ РЕКУРСИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА С КВАНТОВЫМИ ВАКУУМНЫМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ

Научная статья

Гоц С.С.^{1,*}¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (g_ss[at]rambler.ru)

Аннотация

Предложена и обоснована SG гипотеза, согласно которой $1/f$ -шум непрерывного типа сопровождается рекурсивное взаимодействие с аттосекундными задержками в положительной обратной связи квантовых вакуумных флуктуаций со взаимно некоррелированными носителями тока. Показано, что указанное взаимодействие приводит к интегральному преобразованию синего шума, создаваемого квантовыми флуктуациями. Рассмотрены две полуэмпирические и две компьютерные динамические модели $1/f$ -шума. Установлено, что результаты аналитических и численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными по спектрам, статистике, динамике изменения формы реализаций и модифицированных фазовых портретов $1/f$ -шума естественного происхождения в полупроводниковых приборах. Полученные результаты работы могут быть полезны для более широкого и эффективного использования радиофизических методов в статистической и в квантовой физике.

Ключевые слова: $1/f$ -шум, f -шум, белый шум, синий шум, квантовые вакуумные флуктуации, нулевые колебания, аттосекундные задержки.

1/F NOISE IN RECURSIVE INTERACTION BETWEEN CURRENT CARRIERS AND QUANTUM VACUUM FLUCTUATIONS

Research article

Gots S.S.^{1,*}¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

* Corresponding author (g_ss[at]rambler.ru)

Abstract

The SG hypothesis is proposed and substantiated, according to which continuous-type $1/f$ noise accompanies recursive interactions with attosecond delays in the positive feedback of quantum vacuum fluctuations with uncorrelated current carriers. It is shown that this interaction leads to an integral transformation of the blue noise generated by quantum fluctuations. Two semi-empirical and two computational dynamic models of $1/f$ noise are examined. It has been established that the results of analytical and numerical calculations agree well with experimental data on the spectra, statistics, dynamics of shape changes in realisations, and modified phase portraits of naturally occurring $1/f$ noise in semiconductor devices. The obtained results may be useful for the wider and more effective application of radiophysical methods in statistical and quantum physics.

Keywords: $1/f$ noise, f -noise, white noise, blue noise, quantum vacuum fluctuations, zero-point vibrations, attosecond delays.

Введение

Фликкер-шум был обнаружен около 100 лет тому назад. С тех пор этот вид шума порождает массу вопросов о природе и механизмах его формирования. Отметим, что к фликкер-шуму относят неравновесные низкочастотные (НЧ) флуктуации, у которых спектральная плотность мощности (СПМ) $S(f, I)$ аппроксимируется зависимостью

$$S(f, I) = C_0 I^\beta / f^\gamma \quad (1)$$

где f — частота, I — средний ток через образец, C_0 — коэффициент аппроксимации, а для β и индекса СПМ γ выполняются неравенства

$$0,8 \leq \beta \leq 2; \quad 0,8 \leq \gamma \leq 2. \quad (2)$$

Частным случаем фликкер-шума является $1/f$ -шум [1], [2], [3], впервые обнаруженный в полупроводниках около 70 лет тому назад и имеющий диапазон изменения γ вблизи 1, обычно в пределах

$$0,8 \leq \gamma \leq 1,2. \quad (3)$$

В 1957 году A.L. McWhorter предложил модель, согласно которой в полупроводниках $1/f$ -шум возникает в результате захвата носителей заряда на медленные поверхностные состояния. Позднее A. Van der Ziel [1] разработал модифицированный вариант упомянутой модели $1/f$ -шума. В 1969 году F.N. Hooge [2] предложил полуэмпирическую формулу, описывающую $1/f$ -шум в физических системах.

В 1970-е годы было экспериментально установлено, что $1/f$ -шум наблюдается не только в физических, но и в самых разнообразных природных, технических, социально-экономических и биологических системах. В связи с этим стало актуальным создание таких теоретических моделей $1/f$ -шума, которые имеют единый подход для всех

природных систем. Одной из первых работ в этом направлении стала квантовая теория Р. Handel [4]. Согласно этой теории, $1/f$ -шум возникает как результат взаимодействия носителей заряда со свободными от влияния теплового шума квантовыми флуктуациями в инфракрасной области спектра. Перенос спектра флуктуаций в область НЧ происходит за счет частичного рассеяния энергии зарядов на акустических фононах. К сожалению, работа Handel имела ряд серьезных ошибок и противоречий с законом сохранения энергии. Всё это на несколько десятков лет затормозило развитие новых идей по созданию квантовых моделей $1/f$ -шума [5].

В предлагаемой работе впервые рассмотрены механизмы формирования $1/f$ -шума в результате рекурсивного взаимодействия носителей тока в полупроводниках с НЧ квантовыми вакуумными флуктуациями на фоне сильной аддитивной помехи от теплового шума.

Цель работы: Формулировка и проверка на основе полуэмпирических моделей, аналитических расчетов, компьютерного моделирования и натурального эксперимента SG гипотезы о связи природы $1/f$ -шума в физических системах с квантовыми вакуумными флуктуациями (далее — квантовыми флуктуациями) или с нулевыми колебаниями вакуума [6] (далее — нулевыми колебаниями).

Для реализации поставленной цели предстоит решить следующие задачи:

1. Рассмотреть особенности обнаружения и изучения $1/f$ -шума и квантовых флуктуаций на фоне теплового шума.
2. Рассмотреть модели формирования $1/f$ -шума на высоких частотах.
3. Сформулировать SG гипотезу о том, что НЧ $1/f$ -шум сопровождает рекурсивное взаимодействие носителей тока с НЧ квантовыми флуктуациями. Предложить полуэмпирические модели $1/f$ -шума.
4. Изучить рекурсивное взаимодействие квантовых флуктуаций с носителями тока с аттосекундными задержками в цепи обратной связи.
5. Предложить динамические модели $1/f$ -шума, построенные в рамках авторегрессионной модели 1-го порядка и рекурсивного фильтра нижних частот. Сравнить результаты численных расчетов $1/f$ -шума с экспериментом.

Объектом исследования в работе являются полупроводники и полупроводниковые приборы. Предметом исследования является $1/f$ -шум и возможные механизмы его возникновения. В работе используются радиофизические и цифровые методы обнаружения, преобразования и обработки сигналов, порождаемых НЧ квантовыми флуктуациями.

Квантовые флуктуации и $1/f$ -шум на фоне теплового шума

Наблюдение $1/f$ -шума возможно, если он является избыточным, т.е. превышает по уровню тепловой шум. В настоящее время тепловой шум чаще всего рассматривают совместно с квантовыми флуктуациями (нулевыми колебаниями) [6]. Для такой совокупности СПМ $S_U(f)$ флуктуаций напряжения на участке разомкнутой цепи с активным сопротивлением R

$$S_U(f) = \frac{4Rhf}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1} + 2Rhf, \quad (4)$$

где k_B — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка, T — абсолютная температура. В замкнутых цепях СПМ $S_I(f)$ тепловых флуктуаций тока

$$S_I(f) = \frac{4hfR^{-1}}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1} + 2hfR^{-1} = 2hfR^{-1} \operatorname{Cth}\left(\frac{hf}{2k_B T}\right), \quad (5)$$

При $R=1$ Ом, (4), (5) можно свести в одну формулу

$$S_W(f) = 2hf \cdot \operatorname{Cth}\left(\frac{hf}{2k_B T}\right) \quad (6)$$

Анализ (4), (5), (6) показывает, что на высоких частотах при $f \gg k_B T/h$ тепловой шум не маскирует спектр квантовых флуктуаций. Это позволяет изучать их при комнатных температурах в оптической и УФ области спектра, где СПМ теплового шума (при $R=1$ Ом) определяется исключительно СПМ квантовых флуктуаций $S_B(f)$

$$S_B(f) = 2hf \quad (7)$$

На рисунке 1 приведены расчетные СПМ $S_w(f)$ теплового шума.

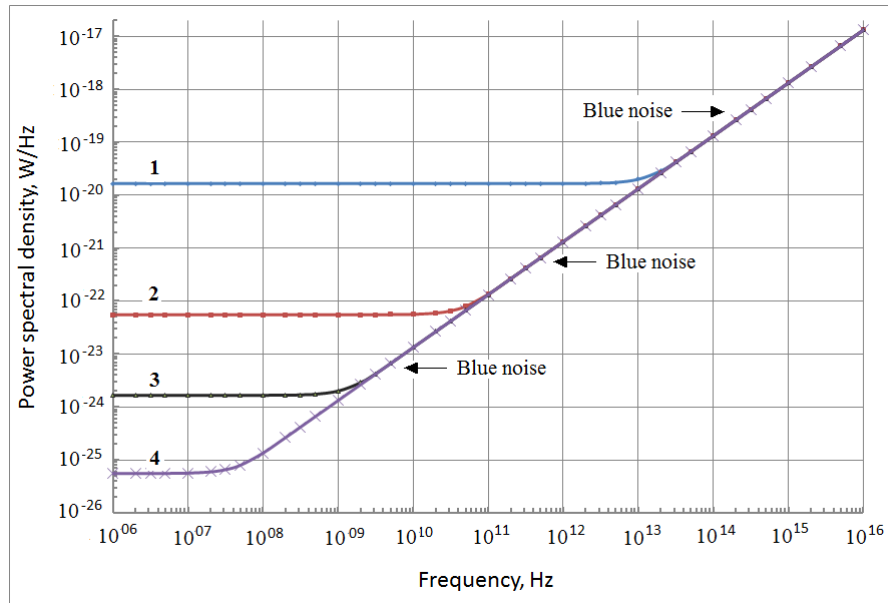


Рисунок 1 - Расчетные СПМ теплового шума цепи с активным сопротивлением $R=1$ Ом при температурах:
 1 - $T=300$ К; 2 - $T=1$ К; 3 - $T=0,03$ К; 4 - $T=0,001$ К
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.1>

Видно, что $S_w(f) \propto f$ при $f > 10^{11} T$ [Гц]. Шум с $S(f) \propto f$, получил название f -шум или «синий шум» [7]. В природе синий шум не наблюдается. Связано это с двумя факторами. На частотах $f < 10^{11} T$ [Гц] синий шум квантовых флуктуаций маскируется тепловым белым шумом. На частотах $f > 10^{11} T$ [Гц] синий шум преобразуется в другой вид шума (см. далее).

Модель высокочастотного $1/f$ -шума

Рассмотрим в субмикронных системах атипичный, высокочастотный (ВЧ), равновесный $1/f$ -шум, особенность которого обусловлена двумя факторами: ВЧ диапазоном и равновесным характером шума.

Согласно флуктуационно-диссипационной теореме (ФДТ) [8] для СПМ теплового токового шума в линейных электрических цепях

$$S_I(f) = C \text{th} \left(\frac{hf}{2k_B T} \right) 2 hf \text{Re}(\dot{Y}(f)), \quad (8)$$

где $\dot{Y}(f) = G(f) + iB(f)$ — адмиттанс. В частности, в эквивалентной схеме с соединенным последовательно резистором R с индуктивностью L

$$S_I(f) = C \text{th} \left(\frac{hf}{2k_B T} \right) \frac{2hfR^{-1}}{1+(2\pi f)^2 \tau^2}, \quad (9)$$

где $\tau=L/R$. На рисунке 2 приведены рассчитанные по (9) СПМ теплового шума проводника с $R=1$ Ом, $\tau=1$ нс.

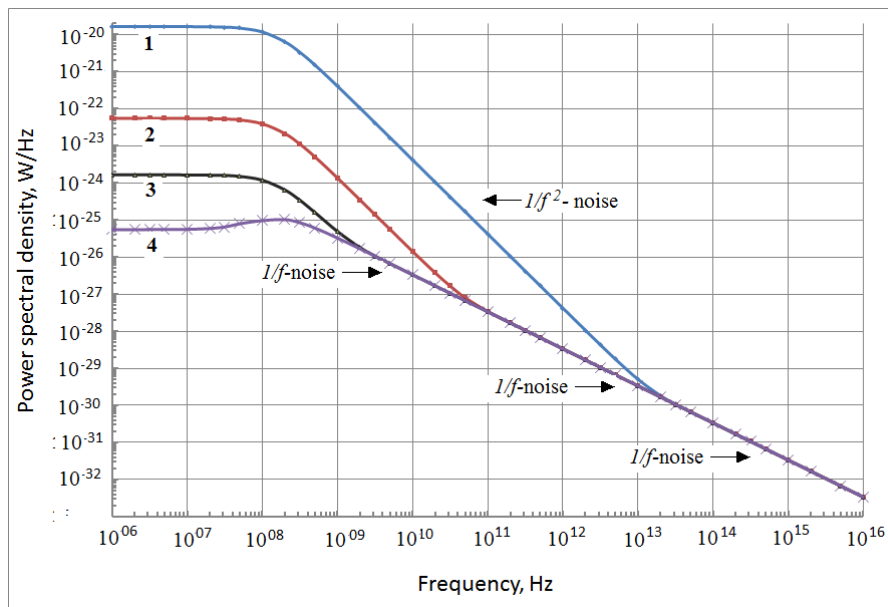


Рисунок 2 - Расчетные с учетом ФДТ СПМ тепловых флуктуаций тока в проводнике при различных температурах: 1 - $T=300$ К; 2 - $T=1$ К; 3 - $T=0,03$ К; 4 - $T=0,001$ К
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.2>

На частотах $f > 10^{11} T$ [Гц]

$$S_I(f) = \frac{2hfR^{-1}}{1+(2\pi f)^2\tau^2}, \quad (10)$$

и СПМ ВЧ участка спектра приобретает зависимость вида $1/f$. Полученный результат сопряжен с рядом ограничений, связанных с приближением для цепей с сосредоточенными параметрами и с идеализацией элементов R и L , поскольку при $f > 3$ ГГц сложно обеспечить частотно независимые характеристики R и L . Тем не менее, такой расчет полезен при поиске механизмов формирования $1/f$ -шума, а также — при планировании экспериментов при сверхнизких температурах порядка 1 мК по наблюдению квантовых флуктуаций (нулевых колебаний) [6], [9]. Заметим, что при соответствующих τ (10) может описывать и НЧ $1/f$ -шум.

SG гипотеза и созданные на ее основе модели НЧ $1/f$ -шума

4.1. SG гипотеза об источниках $1/f$ -шума

В НЧ диапазоне, например на звуковых частотах, при $T=300$ К СПМ квантовых флуктуаций более чем на десять порядков меньше СПМ тепловых флуктуаций. Поэтому выглядит призрачным формирование $1/f$ -шума путем пассивного преобразования сигналов квантовых флуктуаций. Попробуем преодолеть такое предубеждение. Заметим, что тепловой шум является равновесным, и поэтому согласно (5), (6) его СПМ ограничена по величине вне зависимости от величины тока. Для неравновесного $1/f$ -шума нет подобных ограничений.

Обычно в качестве первичного источника $1/f$ -шума рассматривают белый шум [1], [10]. Можно выделить следующие три вида преобразований белого шума в $1/f$ -шум: дробное интегрирование 0.5 порядка [11]; интегральные преобразования [10]; авторегрессионные марковские модели [12]. В физических системах с низкой плотностью носителей тока, например в слабо легированных полупроводниках, указанные преобразования можно упростить, если выбрать первичный процесс, который при кратном интегрировании по времени даст $1/f$ -шум.

Предлагается SG гипотеза о природе $1/f$ -шума, имеющего реализации непрерывного типа. Согласно SG гипотезе в проводнике с током в процессе нерекурсивного или рекурсивного взаимодействия квантовых флуктуаций с взаимно некоррелированными носителями тока с аттосекундными задержками в петле положительной обратной связи за счет интегрирования по времени синего шума (f -шума), создаваемого квантовыми флуктуациями (нулевыми колебаниями), инициализируется $1/f$ -шум. Отметим, что для SG гипотезы не существенна величина взаимной корреляции квантовых флуктуаций [13], [14].

4.2. Линейная полуэмпирическая модель $1/f$ -шума

Функциональная схема, соответствующая линейной полуэмпирической модели $1/f$ -шума, изображена на рисунке 3 (а). На схеме распределённые вдоль проводника N источники квантовых флуктуаций изображены, как генераторы синего шума $g_1 \dots g_k \dots g_N$, СПМ $S_g(f)$ каждого из которых

$$S_g(f) = 2hfR^{-1}. \quad (11)$$

Интегрирование по времени синего шума с $g_1 \dots g_k \dots g_N$ происходит соответственно в фильтрах нижних частот $LP_1 \dots LP_N$. Введем упрощение, от которого далее избавимся. Предположим, что интегрирование по времени синего шума от каждого источника g_i с преобразованием его в шумовой ток $j(t)$ происходит за счет инерционности носителей тока со временем релаксации τ_{LP} и описывается обобщенным уравнением Ланжевена



$$\frac{dj(t)}{dt} \tau_{LP} + j(t) = g_i(t). \tag{12}$$

Переходя к СПМ $S_j(f)$ флуктуаций тока $j(t)$ и, учитывая (11), имеем

$$S_j(f) = \frac{2hfR^{-1}}{1+(2\pi f)^2\tau_{LP}^2}, \tag{13}$$

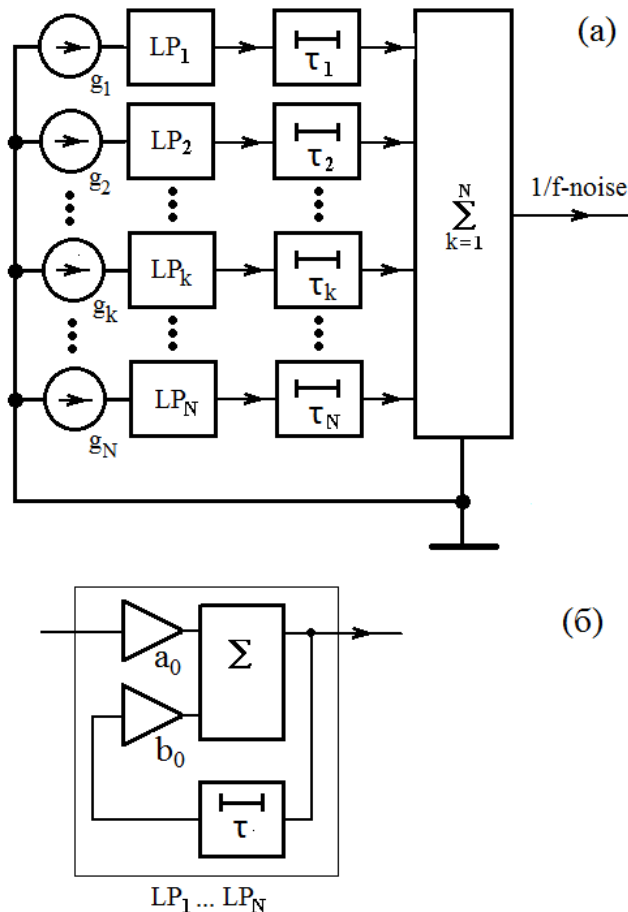


Рисунок 3 - Функциональная схема:

a - преобразование сигналов по моделям 1/f-шума; б - фильтров нижних частот $LP_1 \dots LP_N$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.3>

Будем считать, что полупроводник (проводник) с током представляет собой локально неравновесную среду [10]. В одномерном приближении положим, что процессы равновесного обмена энергией каждого носителя тока с источниками $g_1 \dots g_k \dots g_N$ квантовых флуктуаций происходят на участках проводника, протяженность каждого из которых равна размеру a элементарной ячейки. За время t_1 для проводника длиной z по порядку величины число таких процессов обмена $N = z \cdot t_1 \cdot I / (q \cdot a)$. В силу аддитивности СПМ флуктуаций некоррелированных носителей тока и пренебрежения в области НЧ малой величиной временных задержек $\tau_1 \tau_2 \dots \tau_k \dots \tau_N$ шумовых сигналов в проводнике неравновесная СПМ полного шумового тока будет равна сумме N слагаемых СПМ (13) квантовых флуктуаций, ретранслируемых в проводник каждым k -м носителем тока.

$$S_I(f, I) = \sum_{k=1}^{\frac{z t_1 I}{q a}} \left\{ \frac{2hfR^{-1}}{[1+(2\pi f \tau_{LP})^2]} \right\}_k = \frac{2hf I z t_1 R^{-1}}{q a [1+(2\pi f \tau_{LP})^2]} \tag{14}$$

При $f \gg 1/(2\pi\tau_{LP})$ (14) дает для $S_i(f, I)$ $1/f$ зависимость от частоты и линейную зависимость СПМ от тока:

$$S_I(f, I) = \frac{2h I R^{-1} t_1 Z}{q a (2\pi \tau_{LP})^2 f} \tag{15}$$

Проведем согласно (15) численные оценки СПМ для следующего примера $R^{-1} = 6.6 \cdot 10^{-3} \text{ См}$; $I = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А}$; $f = 10 \text{ Гц}$; $t_1 = 1 \text{ с}$, $\tau_{LP} = 1 \text{ с}$, $a = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $z = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_I(f, I) \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2 / \text{Гц}. \tag{16}$$

Результат (16) по порядку величины хорошо согласуется с данными [15].

4.3. Нелинейная полуэмпирическая модель $1/f$ -шума

Рассмотрим в качестве проводника включенный в прямом направлении полупроводниковый диод с экспоненциальным участком вольт-амперной характеристики (ВАХ)

$$I(U) = I_0 \exp\left(\frac{qU}{\vartheta k_B T}\right). \quad (17)$$

Малая величина относительных флуктуаций тока позволяет полагать, что они происходят на небольшом квазилинейном участке ВАХ, для которого справедливы полученные ранее в линейном приближении формулы (14), (15) с уточнением о том, что активную проводимость R^{-1} придется заменить дифференциальной проводимостью $G_d(I) = dI/dU$

$$G_d(I) = I \frac{q}{\vartheta k_B T}, \quad (18)$$

где $1 \leq \vartheta \leq 2$. Подставляя $G_d(I)$ в (14), имеем

$$S_I(f, I) = \frac{2hzft_1 I^2}{\vartheta k_B T a [1 + (2\pi f \tau_{LP})^2]}. \quad (19)$$

При выполнении условия $f \gg 1/(2\pi\tau_{LP})$ формула (19) примет вид

$$S_I(f, I) = \frac{2hz t_1 I^2}{\vartheta k_B T a f (2\pi\tau_{LP})^2}. \quad (20)$$

С экспоненциальной нелинейностью получена квадратичная зависимость СПМ от величины I , что согласуется с (1), (2). Проведем численные оценки согласно (20) для следующего примера:

$$I = 210^{-2} \text{ А}; f = 10 \text{ Гц}; t_1 = 1 \text{ с}, \tau_{LP} = 1 \text{ с}, a = 310^{-10} \text{ м}, z = 310^{-3} \text{ м}, T = 300 \text{ К}, \vartheta = 1, \quad (21)$$

$$S_I(f, I) \approx 310^{-12} \text{ А}^2 / \text{Гц} \cdot \text{ц}.$$

Результаты расчетов (21) хорошо согласуются по порядку величины с экспериментальными данными, например, [15].

Механизм связи носителей тока с квантовыми флуктуациями

Недостатком рассмотренных выше моделей $1/f$ -шума является ограниченность частотного диапазона $1/f$ -шума в области НЧ. Эксперименты показывают, что $1/f$ -шум наблюдается до частот $10^3 \dots 10^8$ Гц [1]. Для достижения столь низких частот времена релаксации τ_{LP} должны составлять величину порядка $10^2 \dots 10^7$ с. Носители тока в полупроводниках не обладают столь большими временами релаксации. Для получения подобных времен чаще всего применяется модель двухуровневой системы локальных энергетических уровней, разделенных туннельно-тонкими барьерами [1], [16]. Нет оснований утверждать, что такая модель верна для взаимодействия квантовых флуктуаций с носителями тока. Проблему с получением τ_{LP} порядка $10^2, \dots, 10^7$ с можно устранить, если усмотреть в качестве связующего звена между квантовыми флуктуациями и каждым носителем тока схему рекурсивного фильтра НЧ 1-го порядка (Рисунок 3 (б)).

На вход каждого фильтра $LP_1 \dots LP_N$ поступает сигнал квантовых флуктуаций. С выхода фильтра сигнал возбуждает один из носителей тока. Время задержки τ в петле обратной связи определяется прохождением сигнала со скоростью электромагнитной волны в вакууме c расстояния, равного размеру a типичной элементарной ячейки полупроводника

$$\tau = \frac{a}{c} \approx \frac{3 \cdot 10^{-10} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 10^{-18} \text{ с}. \quad (22)$$

Не следует опасаться того, что рекордно малая [17], [18] аттосекундная задержка τ не обеспечит возможность работы фильтра в НЧ области. Действительно, комплексный коэффициент передачи фильтра [19]

$$\dot{K}(f) = \frac{a_0}{1 - b_0 \exp(i2\pi f \tau)} \quad (23)$$

Модуль коэффициента передачи

$$|\dot{K}(f)| = \frac{a_0 / (1 - b_0)}{\sqrt{1 + \frac{4b_0 \sin^2(\pi f \tau)}{(1 - b_0)^2}}}. \quad (24)$$

С учетом (22) для всех $f < 10^{16}$ Гц можно приблизительно записать

$$|\dot{K}(f)| \approx \frac{a_0 / (1 - b_0)}{\sqrt{1 + \frac{b_0 (2\pi f \tau)^2}{(1 - b_0)^2}}}. \quad (25)$$

Положим, что $a_0 = 1 - b_0$, а величину $b_1 < 1$ устремим к 1 с точностью до 25 знака после запятой. С учётом этого (25) примет вид

$$|\dot{K}(f)| \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_2)^2}}, \quad (26)$$

где $\tau_2 = \tau / (1 - b_0)$. Пусть, например $b_0 = 1 - 10^{-25}$. Тогда $\tau_2 = 2 \cdot 10^7$ с.

Эксперименты и компьютерный синтез $1/f$ -шума и синего шума

6.1. Компьютерный синтез синего шума

На базе ПК был создан 24-битный генератор сигналов с прямым цифровым синтезом, позволяющий получать электрические сигналы синего, белого и $1/f$ шума в полосе частот от 10 Гц до 38 кГц. Усредненный индекс СПМ синего шума составлял $\gamma = 0.999 \pm 0.001$. Усредненные коэффициенты асимметрии и эксцесса по модулю не превышали величину 0.1.

Для компьютерной эмуляции временных рядов $\{x_i\}$ синего шума использовано дифференцирование дробного порядка центрированного белого гауссовского шума. Реализации синего шума записывались в память в виде массива данных $x[i]$ и содержала $2^{16} - 2^{17}$ семплов.

6.2. Первая динамическая модель $1/f$ -шума

В этой модели временные ряды $\{x_i\}$, состоящие из 2^{17} семплов синего шума, интегрировались численными методами. На рисунке 4 изображены мгновенная (1) и усредненная (2) СПМ $1/f$ -шума, полученные путем интегрирования по времени соответственно одной и 3000 реализаций f -шума.

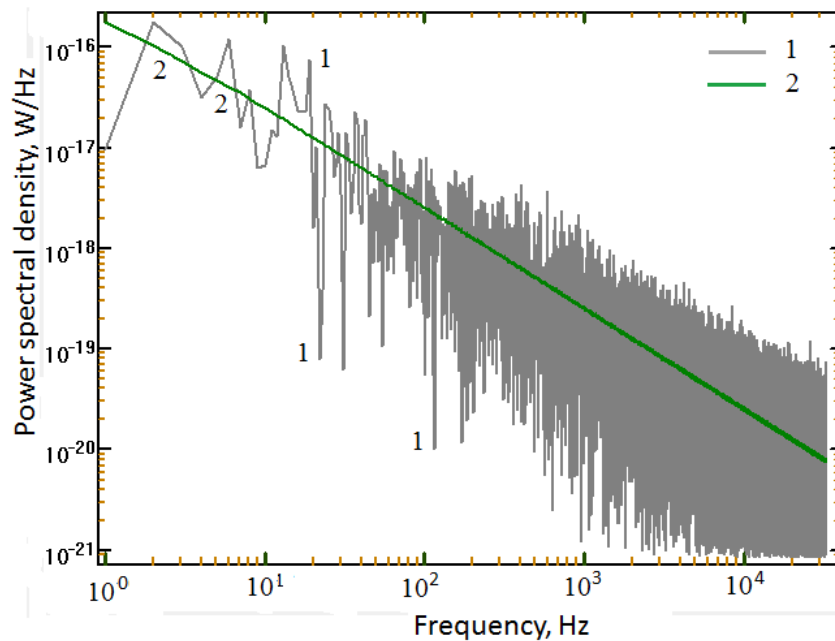


Рисунок 4 - Мгновенная (1) (серый цвет) и усредненная по 3000 реализациям (2) (зеленый цвет) СПМ $1/f$ -шума, полученные из f -шума методом кратного интегрирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.4>

Усредненный по четырём частотным декадам индекс γ СПМ $1/f^\gamma$ -шума составлял 0.99 ± 0.02 . Коэффициенты асимметрии и эксцесса по модулю не превышали 0.1. Приведенные результаты подтверждают ту часть SG гипотезы, которая утверждает, что $1/f$ -шум может формироваться путем интегрирования по времени синего шума (f -шума).

6.3. Вторая динамическая модель $1/f$ -шума

В этой модели расчет временных рядов $\{y_i\}$ $1/f$ -шума происходил на основе авторегрессионной модели 1-го порядка для цепей Маркова [12]. На рисунке 5 изображены расчетные мгновенная (1) и усредненная по 3000 реализациям (2) СПМ $1/f^\gamma$ -шума, полученного на основе авторегрессионной модели. Сравнение СПМ рисунков 4 и 5 показывает, что для СПМ на рисунке 4 $1/f$ зависимость выполняется для 16 октав изменения частоты, а для СПМ на рисунке 5 – для 14 низкочастотных октав (4+ декад $1/f$ -шума), при этом для 15-й и 16-й октав индекс СПМ близок к нулю.

Усредненный индекс СПМ γ , рассчитанный по четырем декадам НЧ части частотной оси, равен 0.98 ± 0.04 . Коэффициент эксцесса составил -0.02 ± 0.01 , коэффициент асимметрии 0.07 ± 0.03 .

Данные рисунка 5 важны в двух аспектах. Во-первых, они еще раз подтверждают SG гипотезу о том, что $1/f$ -шум формируется путем интегрирования по времени синего шума. Во-вторых, использование алгоритма авторегрессионной модели 1-го порядка позволяет реализовать интегрирование по времени синего шума, как минимум, по четырем декадам изменения частоты, что достаточно для большинства приложений.

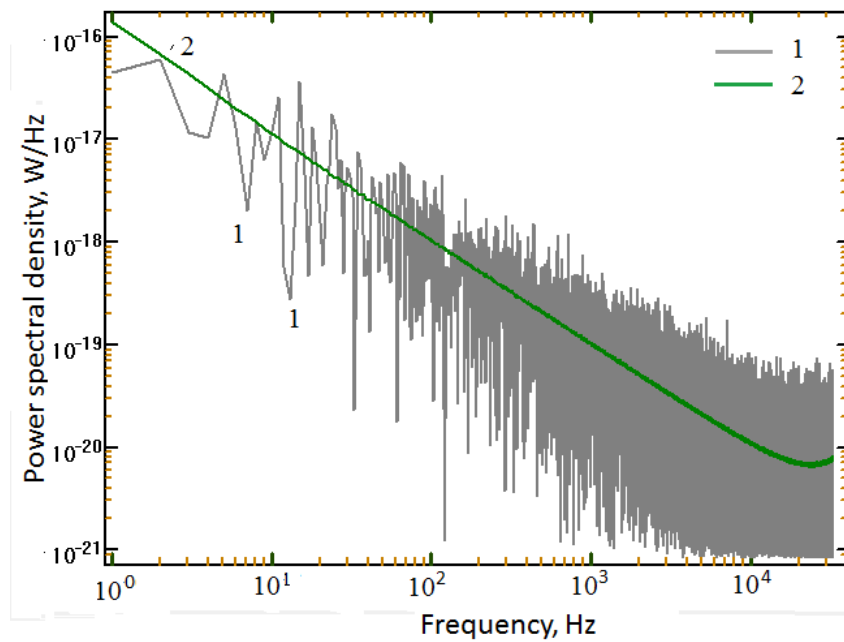


Рисунок 5 - Мгновенная (1) (серый цвет) и усредненная по 3000 реализациям (2) (зелёный цвет) СПМ $1/f$ -шума, полученные из f -шума авторегрессионным методом
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.5>

6.4. Фазовые портреты $1/f$ -шума естественного происхождения

В дополнение к компьютерному моделированию проведены экспериментальные исследования $1/f$ -шума. В качестве объекта исследования использован реализованный на полупроводниковой микросхеме двухканальный микрофонный усилитель. Для уменьшения влияния помех использована мостовая схема измерения, теоретическое обоснование применения которой дано в [20], [21]. Диапазон частот анализа шума составлял $10 \text{ Гц} - 20 \text{ кГц}$. При анализе спектров тактовая частота 24-битного цифрового сигнала составляла 48 кГц , а при анализе фазовых портретов тактовая частота была равна 192 кГц . Анализируемый $1/f$ -шум был квазистационарным и в полосе 3-х частотных декад имел индекс СПМ, равный 1.00 ± 0.02 , а его коэффициенты асимметрии и эксцесса по абсолютной величине были в пределах 0.1 .

На рисунках 6 (а), 6 (б) приведены полученные различными методами фазовые портреты $1/f$ -шума естественного происхождения.

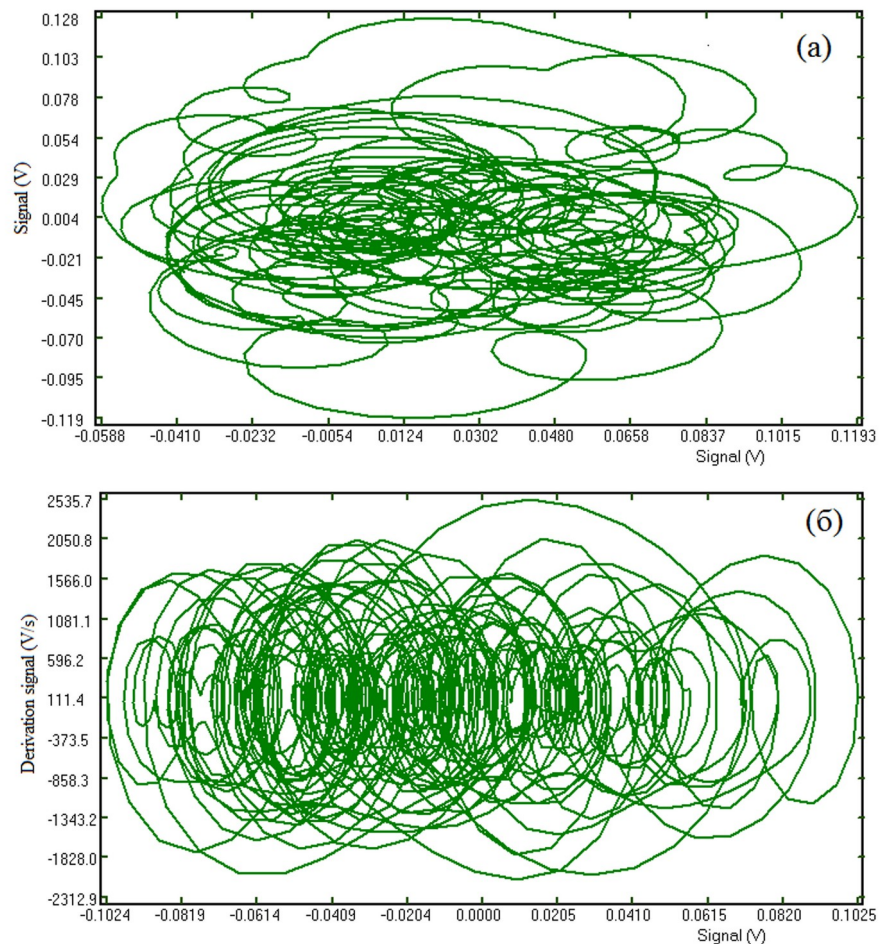


Рисунок 6 - Фазовые портреты $1/f$ -шума, полученные различными методами:
 а - модифицированным методом 2048-канального вокодера; б - классическим методом дифференцирования
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.110.6>

Для рисунка 6 (а) координаты каждой изображающей точки задаются соответствующим отсчетным значением шумового сигнала и этого же сигнала, пропущенного через 2048-канальный цифровой вокодер. Для рисунка 6 (б) координаты каждой k -той изображающей точки задаются классическим методом расчета траекторий на фазовых портретах: соответствующим x_k отсчетным значением шумового сигнала и локальной производной, рассчитанной по пяти $(x_{k-2}, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, x_{k+2})$ отсчетным значениям шумового сигнала. Частота кадров фазовых портретов из 2048 изображающих точек, составляла 62.5 Гц.

Установлено, что каждый кадр фазовых портретов, полученных как методом вокодера, так и классическим методом, имеет уникальный вид по конфигурации и по амплитудам флуктуаций, осцилляционного типа. Эллипсоидная форма участков фазовых траекторий на рис.6 (а), (б) хорошо согласуется с тем, что интегральное преобразование формирует квадратурные компоненты $1/f$ -шума по отношению к исходному сигналу — синему шуму квантовых флуктуаций. Из данных рисунка 6 (а) также следует, что число полных затухающих колебаний в каждом квантовом осцилляторе близко к 1.

Заключение

В результате выполнения данной работы решены все поставленные задачи. В частности, впервые рассмотрены особенности обнаружения и изучения $1/f$ -шума и НЧ квантовых флуктуаций на фоне теплового шума; рассмотрены виртуальные модели формирования $1/f$ -шума на высоких частотах за счет квантовых флуктуаций; предложена SG гипотеза, согласно которой в результате рекурсивного взаимодействия квантовых флуктуаций с некоррелированными носителями тока формируется $1/f$ -шум; созданы две полуэмпирические модели $1/f$ -шума; рассмотрено рекурсивное взаимодействие с аттосекундными задержками в петле положительной обратной связи носителей тока с квантовыми флуктуациями, найден универсальный механизм, за счет которого образуются длительные времена релаксации, формирующие $1/f$ -шум; с помощью разработанных динамических моделей реализован расчет временных рядов $1/f$ -шума авторегрессионным методом 1-го порядка и численным интегрированием временных рядов синего шума; получено хорошее согласие компьютерных расчетов с экспериментами по статистике, спектральным характеристикам, по динамике изменения формы реализаций и фазовых портретов $1/f$ -шума.

Особо следует отметить, что впервые путем численных и аналитических расчетов показано, что рекурсивное взаимодействие квантовых флуктуаций с взаимно некоррелированными носителями тока приводит к интегральному



преобразованию синего шума, создаваемого квантовыми флуктуациями, что, в свою очередь, приводит к формированию $1/f$ -шума в широкой полосе частот с нижней граничной частотой до 10^8 Гц.

Результаты работы могут быть использованы для расширения сфер применения радиофизических методов в статистической физике, в квантовой физике, а также в качестве готового и апробированного методического обеспечения в учебных заведениях естественно-научного и технического профиля [22].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ван дер Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. Пер. с англ. / А. Ван дер Зил. — Москва: Советское радио, 1973. — 178 с.
2. Hooge F.N. $1/f$ -noise / F.N. Hooge // *Physica*. — 1976. — Vol. 83. — P. 14–23. — DOI: 10.1016/0378-4363(76)90089-9
3. Kogan Sh. Electronics noise and fluctuations in solids, Institute of Radio engineering and Electronics / Sh. Kogan. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 354 p.
4. Handel P. $1/f$ Noise An “Infrared” Phenomenon / P. Handel // *Phys. Rev. Lett.* — 1975. — Vol. 34. — P. 1492–1495. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.34.1492
5. Kazakov K.A. Effect of the charge-carrier-phonon interaction on the fundamental $1/f$ voltage noise / K.A. Kazakov // *Physical Review A*. — 2022. — Vol. 106. — P. 062214–062233. — DOI: 10.1103/PhysRevA.106.062214
6. Tsipenyuk Yu.M. Zero point energy and zero point oscillations: how they are detected experimentally / Yu.M. Tsipenyuk // *Physics Advances*. — 2012. — Vol. 55. — P. 796–807. — DOI: 10.3367/UFNE.0182.201208E.0855
7. Yan D.M. A Survey of Blue-Noise Sampling and Its Applications / D.M. Yan, J.W. Guo, B. Wang // *J. Comput. Sci. Technol.* — 2015. — Vol. 30. — P. 439–452.
8. Callen H.B. Irreversibility and generalized noise / H.B. Callen, T.A. Welton // *Phys. Rev.* — 1951. — Vol. 83. — № 1. — P. 34–40. — DOI: 10.1103/PhysRev.83.34
9. Farley C. Sensing quantum vacuum fluctuations with non-Gaussian electronic noise / C. Farley, E. Pinsolle, B. Reulet // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 134. — P. 166301–166308. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.166301
10. Morozov A.N. Flicker Noise in a Locally Nonequilibrium Medium / A.N. Morozov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. — 2018. — Vol. 107. — P. 798–799. — DOI: 10.1134/S002136401812010X
11. Учайкин В.В. Метод дробных производных / В.В. Учайкин. — Ульяновск: Артишок, 2008. — 512 с.
12. Erland S. Constructing $1/\omega^a$ noise from reversible Markov chains / S. Erland, P.E. Greenwood // *Phys. Rev. E*. — 2007. — Vol. 76. — P. 031114–031128. — DOI: 10.1103/PhysRevE.76.031114
13. Benea-Chelmus I.C. Electric field correlation measurements on the electromagnetic vacuum state / I.C. Benea-Chelmus, F.F. Settembrini, G. Scalari et al. // *Nature*. — 2019. — Vol. 568. — P. 202–206. — DOI: 10.1038/s41586-019-1083-9
14. Settembrini F.F. Detection of quantum-vacuum field correlations outside the light cone / F.F. Settembrini, F.A. Lindel, M. Herter et al. // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — P. 3383–3387. — DOI: 10.1038/s41467-022-31081-1
15. Бочкарева Н.И. Прыжковый транспорт в области объемного заряда р-п-структур с квантовыми ямами InGaN/GaN как источник избыточного $1/f$ шума и потерь эффективности светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.М. Иванов, А.В. Клочков и др. // *Физика и техника полупроводников*. — 2015. — Т. 49. — С. 847–855.
16. Клюев А.В. Шумы в радиоэлектронных приборах / А.В. Клюев, А.В. Якимов. — Нижний Новгород: ННГУ, 2023. — 65 с.
17. Желтиков А.М. В поисках утраченного времени: аттосекундная физика, петагерцовая оптоэлектроника, и предельная скорость квантовой динамики. / А.М. Желтиков // *Успехи физических наук*. — 2021. — Т. 191. — № 4. — С. 386–403. — DOI: 10.3367/UFN.2020.11.038884
18. Jiang W.Ch. Time Delays as Attosecond Probe of Interelectronic Coherence and Entanglement / W.Ch. Jiang, M.Ch. Zhong, Y.K. Fang et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 133. — P. 163201. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.163201
19. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. — Москва: Радио и связь, 1986. — 512 с.
20. Zakharov Yu.A. Bridge method for studying the spectra of current fluctuations in tungsten filaments at the frequency range $1.5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Hz. / Yu.A. Zakharov, S.S. Gots, R.Z. Bakhtizin // *Measurement Techniques*. — 2021. — Vol. 64. — № 5. — P. 364–372. — DOI: 10.1007/s11018-021-01942-0
21. Zakharov Yu.A. Experimental Study of the Spectral and Correlation Characteristics of Low-Frequency Fluctuations in Tungsten Filaments / Yu.A. Zakharov, S.S. Gots, R.Z. Bakhtizin et al. // *Journal of Communications Technology and Electronics*. — 2022. — Vol. 67. — № 10. — P. 1216–1223. — DOI: 10.1134/S1064226922100175



22. Гоц С.С. Методическое обеспечение лабораторного практикума при изучении квантовых флуктуаций и 1/f-шума в полупроводниковых приборах / С.С. Гоц // Проблемы современного физического образования. Материалы VIII Всероссийской научно-методической конференции. — Уфа: РИЦ УУНиТ, 2025. — С. 40–41.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Van der Zil A. Shum. Istochniki, opisaniye, izmereniye. Per. s angl. [Noise (Sources, Characterization, Measurement). Transl. from Eng.] / A. Van der Zil. — Moscow: Sovetskoe radio, 1973. — 178 p. [in Russian]
2. Hooge F.N. 1/f-noise / F.N. Hooge // *Physica*. — 1976. — Vol. 83. — P. 14–23. — DOI: 10.1016/0378-4363(76)90089-9
3. Kogan Sh. Electronics noise and fluctuations in solids, Institute of Radio engineering and Electronics / Sh. Kogan. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 354 p.
4. Handel P. 1/f Noise An “Infrared” Phenomenon / P. Handel // *Phys. Rev. Lett.* — 1975. — Vol. 34. — P. 1492–1495. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.34.1492
5. Kazakov K.A. Effect of the charge-carrier–phonon interaction on the fundamental 1/f voltage noise / K.A. Kazakov // *Physical Review A*. — 2022. — Vol. 106. — P. 062214–062233. — DOI: 10.1103/PhysRevA.106.062214
6. Tsipenyuk Yu.M. Zero point energy and zero point oscillations: how they are detected experimentally / Yu.M. Tsipenyuk // *Physics Advances*. — 2012. — Vol. 55. — P. 796–807. — DOI: 10.3367/UFNE.0182.201208E.0855
7. Yan D.M. A Survey of Blue-Noise Sampling and Its Applications / D.M. Yan, J.W. Guo, B. Wang // *J. Comput. Sci. Technol.* — 2015. — Vol. 30. — P. 439–452.
8. Callen H.B. Irreversibility and generalized noise / H.B. Callen, T.A. Welton // *Phys. Rev.* — 1951. — Vol. 83. — № 1. — P. 34–40. — DOI: 10.1103/PhysRev.83.34
9. Farley C. Sensing quantum vacuum fluctuations with non-Gaussian electronic noise / C. Farley, E. Pinsolle, B. Reulet // *Phys. Rev. Lett.* — 2025. — Vol. 134. — P. 166301–166308. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.166301
10. Morozov A.N. Flicker Noise in a Locally Nonequilibrium Medium / A.N. Morozov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. — 2018. — Vol. 107. — P. 798–799. — DOI: 10.1134/S002136401812010X
11. Uchajkin V.V. Metod drobnny'x proizvodny'x [Method of fractional derivatives] / V.V. Uchajkin. — Ul'yanovsk: Artishok, 2008. — 512 p. [in Russian]
12. Erland S. Constructing 1/ noise from reversible Markov chains / S. Erland, P.E. Greenwood // *Phys. Rev. E*. — 2007. — Vol. 76. — P. 031114–031128. — DOI: 10.1103/PhysRevE.76.031114
13. Benea-Chelmus I.C. Electric field correlation measurements on the electromagnetic vacuum state / I.C. Benea-Chelmus, F.F. Settembrini, G. Scalari et al. // *Nature*. — 2019. — Vol. 568. — P. 202–206. — DOI: 10.1038/s41586-019-1083-9
14. Settembrini F.F. Detection of quantum-vacuum field correlations outside the light cone / F.F. Settembrini, F.A. Lindel, M. Herter et al. // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — P. 3383–3387. — DOI: 10.1038/s41467-022-31081-1
15. Bochkareva N.I. Prizhkovii transport v oblasti obemnogo zaryada p–n-struktur s kvantovymi yamami InGaN/GaN kak istochnik izbitochnogo 1/f shuma i poter effektivnosti svetodiodov [Hopping in space charge region of p–n-structures with InGaN/GaN quantum wells as a source of excess 1/f noise and losses in efficiency of light-emitting diodes.] / N.I. Bochkareva, A.M. Ivanov, A.V. Klochkov et al. // *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technics of Semiconductors]*. — 2015. — Vol. 49. — P. 847–855. [in Russian]
16. Klyuev A.V. Shumuy' v radioelektronny'x priborax [Noise in radio electronics equipment] / A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. — Nizhny Novgorod: NNGU, 2023. — 65 p. [in Russian]
17. Zheltikov A.M. V poiskakh utrachennoy vremeni: attosekundnaya fizika, petagertsovaya optoelektronika, i predelnaya skorost kvantovoi dinamiki. [In search of lost time: attosecond physics, petahertz optoelectronics, and quantum speed limit] / A.M. Zheltikov // *Uspekhi fizicheskikh nauk [Physics Advances]*. — 2021. — Vol. 191. — № 4. — P. 386–403. — DOI: 10.3367/UFNR.2020.11.038884 [in Russian]
18. Jiang W.Ch. Time Delays as Attosecond Probe of Interelectronic Coherence and Entanglement / W.Ch. Jiang, M.Ch. Zhong, Y.K. Fang et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2024. — Vol. 133. — P. 163201. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.163201
19. Gonorovskij I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly' [Radio circuits and signals] / I.S. Gonorovskij. — Moscow: Radio i svyaz', 1986. — 512 p. [in Russian]
20. Zakharov Yu.A. Bridge method for studying the spectra of current fluctuations in tungsten filaments at the frequency range $1.5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Hz. / Yu.A. Zakharov, S.S. Gots, R.Z. Bakhtizin // *Measurement Techniques*. — 2021. — Vol. 64. — № 5. — P. 364–372. — DOI: 10.1007/s11018-021-01942-0
21. Zakharov Yu.A. Experimental Study of the Spectral and Correlation Characteristics of Low-Frequency Fluctuations in Tungsten Filaments / Yu.A. Zakharov, S.S. Gots, R.Z. Bakhtizin et al. // *Journal of Communications Technology and Electronics*. — 2022. — Vol. 67. — № 10. — P. 1216–1223. — DOI: 10.1134/S1064226922100175
22. Gots S.S. Metodicheskoe obespechenie laboratornogo praktikuma pri izuchenii kvantovikh fluktuatsii i 1/f-shuma v poluprovodnikovikh priborakh [Methodological support for laboratory practice in the study of quantum fluctuations and 1/f noise in semiconductor devices] / S.S. Gots // *Problems of Modern Physical Education. Materials of the VIII All-Russian Scientific and Methodological Conference*. — Ufa: RITs UUNiT, 2025. — P. 40–41. [in Russian]