

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ВОЛЬФРАМОВЫХ НИТЯХ НАКАЛА

© 2022 г. Ю. А. Захаров<sup>а</sup> \*, С. С. Гоц<sup>а</sup>, Р. З. Бахтизин<sup>а</sup>, Т. И. Шарипов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Башкирский государственный университет,  
ул. Заки Валиди, 32, Уфа, 450056 Российская Федерация

\*E-mail: uriyzakhr2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Экспериментально исследованы низкочастотные токовые флуктуации в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот  $6 \times 10^{-5} \dots 1$  Гц. Измерения проведены при температуре нагрева нитей накала 2250 и 2450 К. Показано, что визуально различные по форме реализации низкочастотного (НЧ) шума характеризуются относительно схожими по частотной зависимости спектральными плотностями мощности вида  $1/f^\gamma$ , при этом среднее значение индекса спектральной плотности мощности  $\gamma$  лежит в пределах 1.6...2.0. Установлено, что в отличие от спектральных характеристик автокорреляционные функции по своей форме существенно более разнообразны. Получены численные оценки времени корреляции, времени положительной корреляции и времени антикорреляции НЧ-флуктуаций.

DOI: 10.31857/S0033849422100187

### 1. ОСОБЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ТОКОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В МЕТАЛЛАХ

Электрические и радиотехнические цепи, выполненные на основе металлических проводников, обычно характеризуются чрезвычайно низким уровнем токовых флуктуаций. В связи с этим экспериментальное измерение токовых флуктуаций становится возможным только в относительно узком классе устройств на основе металлических проводников. Впервые токовые флуктуации были обнаружены в термоэлектронных металлических оксидных катодах. В экспериментах Джонсона [1] в 1925 г. было установлено, что в термоэлектронных эмиссионных приборах в области низких частот от десятков герц до единиц килогерц спектральная плотность мощности (СПМ) токового шума имела характерную частотную зависимость вида  $1/f^2$ . Такие низкочастотные (НЧ) шумы получили название фликкер-шума, а в последние годы – красного шума. Примерно до середины 50-х годов фликкер-шум связывали исключительно с миграцией по поверхности атомов из оксидного покрытия термокатодов.

Теоретически и экспериментально было установлено, что частотная зависимость СПМ  $S(f)$  фликкер-шума в оксидных [2] и в вольфрамовых

[3] термокатадах хорошо описывается формулой вида

$$S(f) = \frac{S_0 I^2}{[1 + (f/f_0)^2]^\gamma}, \quad (1)$$

где  $S_0$  – коэффициент аппроксимации,  $I$  – среднее значение эмиссионного тока,  $f_0$  – частота перегиба СПМ фликкер-шума.

В середине 50-х годов НЧ-флуктуации были обнаружены в полупроводниках [4–7]. Отличительным свойством НЧ-флуктуаций в полупроводниковых приборах оказалась характерная частотная зависимость  $S(f)$  вида  $1/f^\gamma$ :

$$S(f) = S_1 / f^\gamma, \quad (2)$$

где  $S_1$  – коэффициент аппроксимации,  $\gamma$  – индекс СПМ, принимающий значения в интервале 0.9...1.5 [4–7]. НЧ-шум с СПМ вида (2) получил название розового шума или  $1/f$ -шума. Отметим, что в научной литературе чаще всего не принято делать различия между понятиями  $1/f$ -шум и фликкер-шум.

Обычно частотная зависимость вида (2) имеет место в ограниченном диапазоне частот, от  $f_L$  до  $f_H$ , где  $f_L$  – нижняя (low) граничная частота, а  $f_H$  – верхняя (high) граничная частота. Выше частоты  $f_H$  зависимость (2) может нарушаться из-за наложения на НЧ-флуктуации дробового и теплового шума, а также собственных шумов измерительного

прибора [4–7]. Нижняя граничная частота  $f_L$  может быть оценена в предположении, что величина  $f_L^{-1}$  не может превышать времени жизни объекта исследования. Сложность экспериментального определения величины  $f_L$  обусловлена тем, что время измерений должно быть не менее  $f_L^{-1}$ , что на практике может исчисляться масштабами времени, достигающих многих тысяч часов.

Исследования фликкер-шума в металлах до последнего времени проводили только в области эмиссионной электроники [1–3] и физики тонких пленок [8–11]. Основной проблемой при исследовании НЧ-флуктуаций тока в макроскопических металлических образцах является чрезвычайно низкий уровень НЧ-флуктуаций. В [12] опубликованы результаты исследования СПМ НЧ-флуктуаций в вольфрамовых нитях накала электрических ламп и описан алгоритм сглаживания СПМ, реализованный в компьютерной программе [13]. В [14] подробно описан оригинальный мостовой метод измерения НЧ-флуктуаций, использованный в [12]. Для оценки температуры нитей накала в [12, 14] использовался специально разработанный метод термосопротивления [15].

При исследовании НЧ-флуктуаций тока в макроскопических металлических образцах при высоких температурах серьезной проблемой является сложность отделения низкочастотных флуктуаций от деградационных процессов [16] в результатах измерений. Применение мостового метода измерений НЧ-флуктуаций позволило в значительной мере решить проблему нежелательного влияния длинновременных деградационных процессов на корректность измерений спектральных характеристик НЧ-флуктуаций.

Цель данной работы – экспериментально исследовать при высоких температурах спектральных и корреляционных характеристик низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала и определить на этой основе время корреляции, время положительной корреляции и время антикорреляции НЧ-флуктуаций.

Выбор в качестве объектов исследования вольфрамовых нитей накала осветительных ламп накаливания с рабочим напряжением 220...240 В ранее был подробно обоснован нами [12, 14, 16].

В данной работе требовалось решить следующие задачи.

1. Усовершенствовать экспериментальную установку и методы измерений, описанные в [12, 14, 16], в плане расширения их функциональных возможностей по исследованию спектральных и корреляционных характеристик НЧ-флуктуаций в вольфрамовых нитях накала.

2. В диапазоне частот  $6 \times 10^{-5}$ ...1 Гц провести измерения спектральных характеристик низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала при высоких температурах их нагрева.

3. В диапазоне частот  $6 \times 10^{-5}$ ...1 Гц провести измерения автокорреляционных функций (АКФ) низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала при высоких температурах их нагрева. На основе полученных АКФ рассчитать времена корреляции, времена положительной корреляции и времена антикорреляции НЧ-флуктуаций.

## 2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ТОКА

При создании усовершенствованного метода измерений спектральных и корреляционных характеристик НЧ-флуктуаций за основу был выбран мостовой метод измерений [14], что продиктовано его следующими достоинствами:

- практически полным подавлением влияния на результаты измерений флуктуаций и пульсаций у источников питания;
- устранением влияния на результаты измерений процессов, связанных с длинновременной деградацией нитей накала при их нагреве;
- возможностью применения цифровой обработки сигналов.

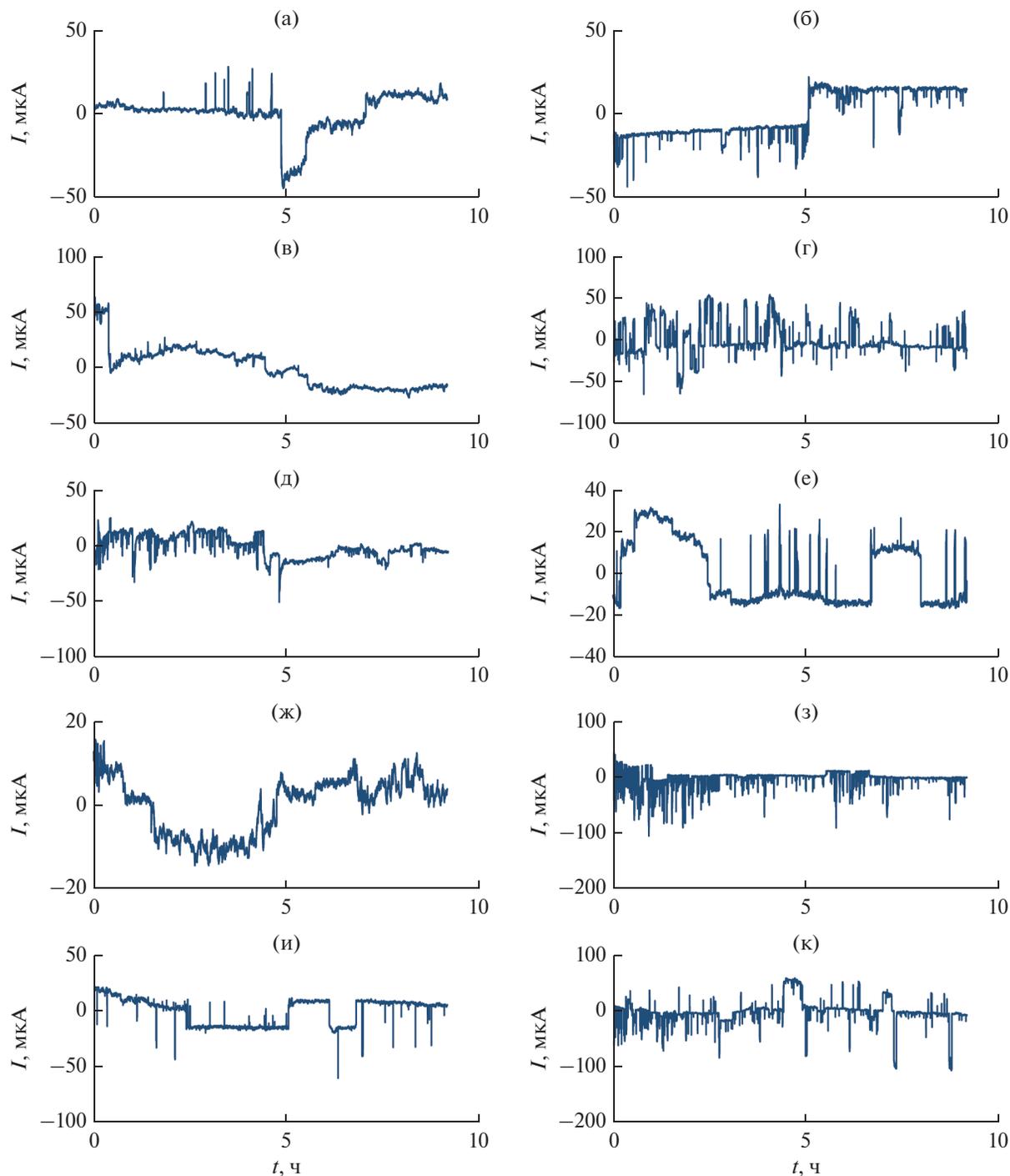
Был разработан усовершенствованный метод [17] измерения температуры нитей накала при их нагреве. Отметим, что при измерении токовых НЧ-флуктуаций непрерывный контроль температуры нагрева током проводника актуален для идентификации параметров объекта исследований.

В данной работе был использован разработанный нами усовершенствованный алгоритм и на его основе составлена компьютерная программа для вычисления автокорреляционной характеристики НЧ-токовых флуктуаций.

Для калибровки установки и проверки разработанных алгоритмов цифровой обработки сигналов был использован сопряженный с ПК DDS (Digital Direct Synthesis) генератор сигналов, позволяющий цифровыми методами синтезировать детерминированные и псевдослучайные сигналы с нижней граничной частотой до  $10^{-5}$  Гц.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все приведенные ниже результаты измерений АКФ и СПМ были выполнены при двух значениях среднеобъемной температуры нитей накала: 2250 и 2450 К. На рис. 1 приведены осциллограммы реализаций НЧ-флуктуаций тока. Длительность всех реализаций составляла  $33000 \pm 4$  с (около 9 ч 10 мин). Отклонения обусловлены погрешностями частоты дискретизации, все реализации содержали одинаковое количество отсчетных значений, равное 66000. Для расчета спектров использовалось 65536 отсчетных значений (с начала). Визу-



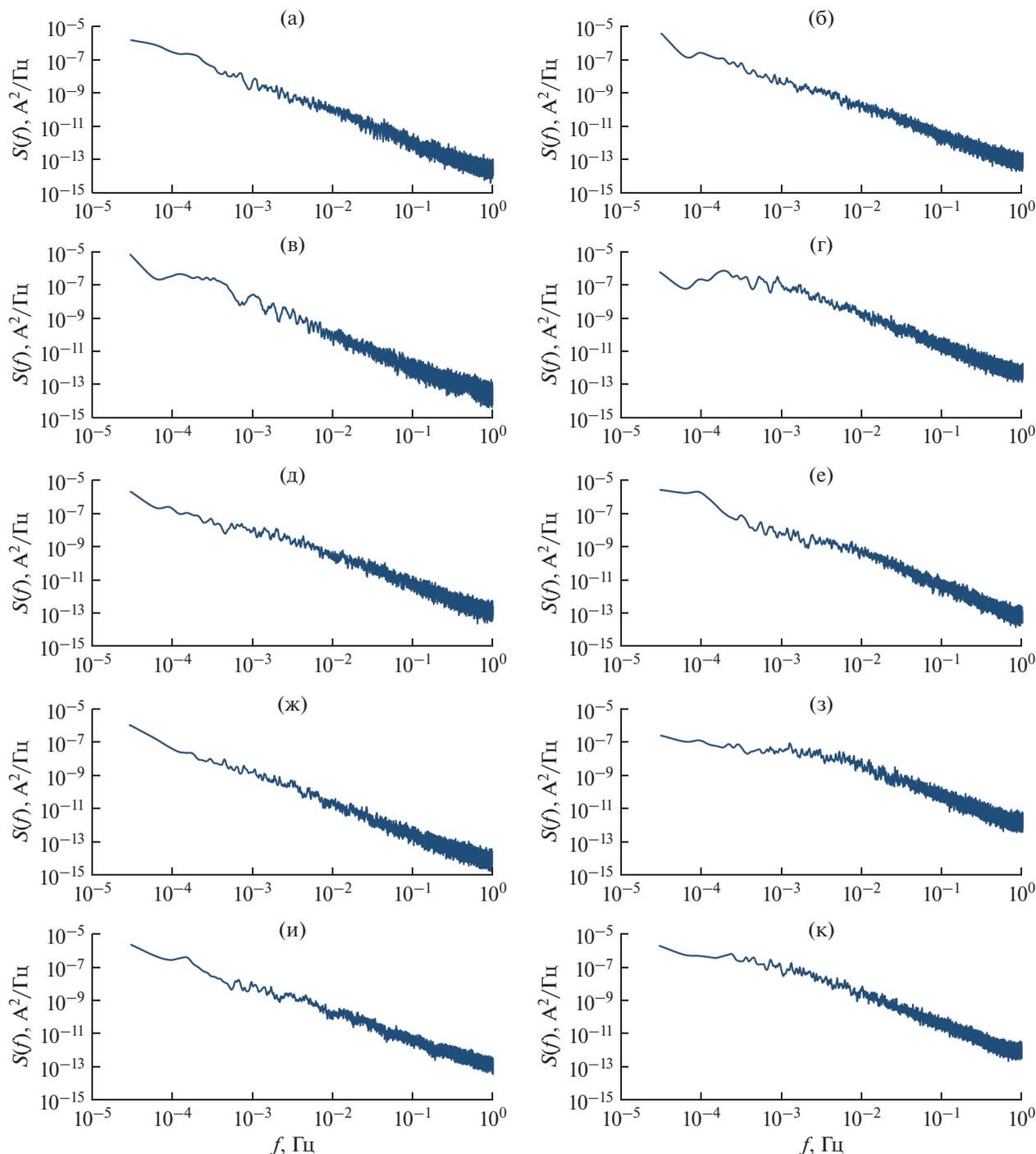
**Рис. 1.** Центрированные реализации НЧ-флуктуаций тока в нитях накала при  $U = 148$  В,  $T = 2250$  К (левая колонка) и  $U = 178$  В,  $T = 2450$  К (правая колонка).

альный анализ всех представленных на рис. 1 реализаций НЧ-шума показывает, что проявлялись НЧ-флуктуации следующих типов:

- квазинепрерывные (в, ж);
- одиночные скачки тока с наложением других видов шума (б);
- множественные скачки тока с наложением других видов шума (и);

– импульсные шумы (а, б, г, д, е, з, и, к).

Сопоставление между собой двух групп реализаций (а, в, д, ж, и) и (б, г, е, з, к) позволяет сделать вывод о том, что повышение температуры нагрева нити накала приводит к более интенсивному проявлению импульсных случайных процессов. При этом при более высоких температурах нагрева нитей накала на первый план выходят



**Рис. 2.** Спектральные плотности мощности, рассчитанные по десяти различным реализациям НЧ-шума при  $U = 148$  В,  $T = 2250$  К (левая колонка) и  $U = 178$  В,  $T = 2450$  К (правая колонка).

НЧ-флуктуации с относительно более короткими импульсами, случайным образом часто повторяющимися во времени в течение всего интервала измерения (9 ч 10 мин).

На рис. 2 представлены частотные зависимости спектральных плотностей мощности токового НЧ-шума в полосе частот  $6 \times 10^{-5} \dots 1$  Гц. Все зави-

симости  $S(f)$  получены путем быстрого преобразования Фурье отсчетных значений соответствующих реализаций на рис. 1 с последующим сглаживанием частотных зависимостей по частоте [12, 13].

Далее при рассмотрении полученных спектров по аналогии с [4–7] будем предполагать, что для НЧ-шума все частотные зависимости  $S(f)$  форми-

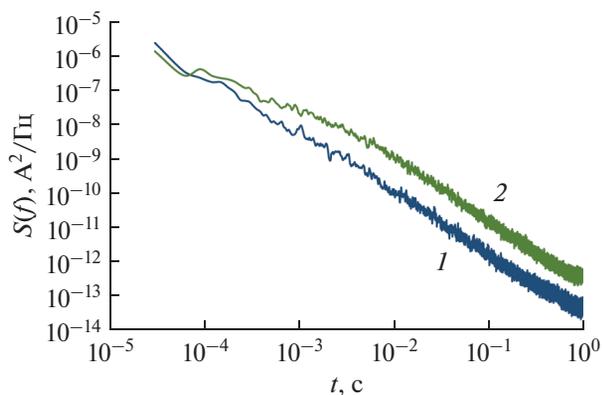


Рис. 3. Усредненные значения СПМ, полученные при  $U = 148$  В,  $I = 85.6$  мА,  $T = 2250$  К (кривая 1) и при  $U = 178$  В,  $I = 93.9$  мА,  $T = 2450$  К (кривая 2).

руются некоторой совокупностью спектров Лоренца (1), так что справедлива аппроксимационная формула

$$S(f) = \sum_i \frac{g(f_{0i})}{[1 + (f/f_{0i})^2]}, \quad (3)$$

где  $g(f_{0i})$  – весовая функция процессов со спектрами Лоренца, имеющими частоты  $f_{0i}$ , на которых наблюдается перегиб частотной зависимости СПМ.

Рассмотрим зависимости  $S(f)$ , полученные при температуре  $T = 2250$  К (см. рис. 2, левая колонка). Практически все эти частотные зависимости  $S(f)$  и усредненные СПМ на рис. 3 (кривая 1) можно достаточно точно аппроксимировать формулой (2) с индексом СПМ  $\gamma = 1.8 \pm 0.2$ . Явно видимых частот  $f_{0i}$  перегиба на указанных выше зависимостях  $S(f)$  не наблюдается. Данные особенности  $S(f)$  свидетельствуют о том, что при температуре 2250 К случайные процессы с точками перегиба  $f_{0i}$ , лежащими в полосе анализируемых частот  $6 \times 10^{-5} \dots 1$  Гц, маскируются более интенсивными процессами, у которых точки перегиба  $f_{0i} < 6 \times 10^{-5}$  Гц. Тем не менее, относительно маловероятные процессы с точками перегиба  $f_{0i} > 6 \times 10^{-5}$  Гц, по-видимому, все же есть, о чем свидетельствует среднее значение индекса СПМ,  $\gamma < 2$ .

Далее рассмотрим зависимости  $S(f)$ , полученные при температуре  $T = 2450$  К (см. рис. 2, правая колонка). Практически все эти частотные зависимости  $S(f)$  и усредненные СПМ на рис. 3 (кривая 2) в частотном диапазоне  $1 \times 10^{-3} \dots 1$  Гц можно достаточно точно аппроксимировать формулой (2) с индексом СПМ  $\gamma = 1.8 \pm 0.2$ . Явно видимых частот  $f_{0i}$  перегиба на указанных выше зависимостях  $S(f)$  не наблюдается. Данные особенности  $S(f)$  свидетельствуют о том, что при температуре 2450 К случайные процессы с точками перегиба

$f_{0i}$ , лежащими в полосе частот  $1 \times 10^{-3} \dots 1$  Гц, маскируются более интенсивными процессами, у которых точки перегиба  $f_{0i} < 1 \times 10^{-3}$  Гц. Тем не менее процессы с точками перегиба  $f_{0i} > 1 \times 10^{-3}$  Гц, по-видимому, все же есть, о чем свидетельствует среднее значение индекса СПМ  $\gamma < 2$  в диапазоне частот  $1 \times 10^{-3} \dots 1$  Гц.

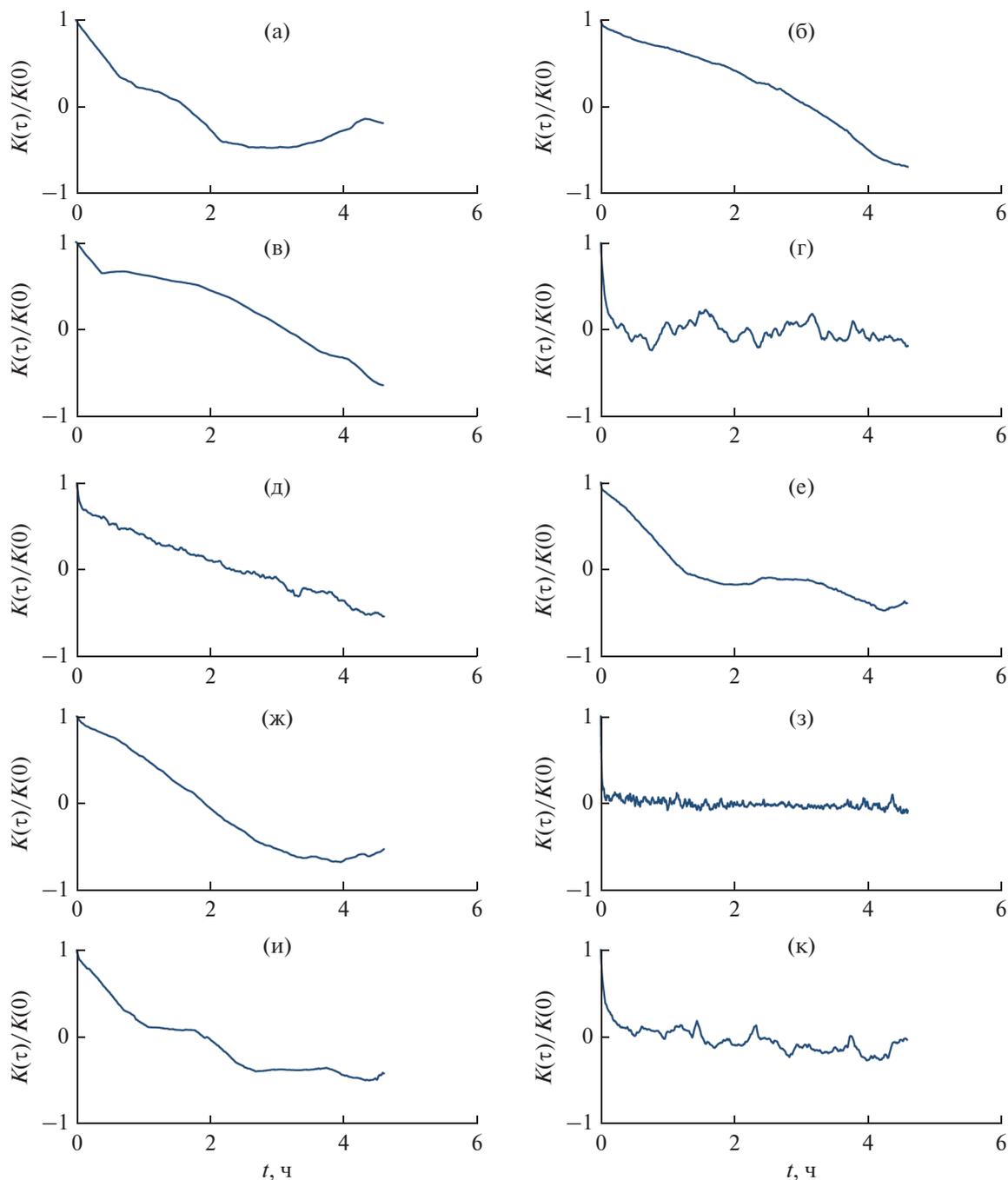
Случайные процессы с точками перегиба  $f_{0i} < 1 \times 10^{-3}$  Гц при температуре  $T = 2450$  К проявляются на рис. 2 (правая колонка) и на рис. 3 (кривая 2) в виде более пологой частотной зависимости  $S(f)$  в частотном диапазоне  $6 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3}$  Гц.

Рассмотрим теперь автокорреляционные функции (АКФ). Для вычисления АКФ нами был использован алгоритм сильно коррелированных выборок [18], обеспечивающий получение наиболее точных оценок АКФ при минимальной длине выборок случайных процессов.

Рассмотрим зависимости нормированных на дисперсию АКФ, полученные при температуре  $T = 2250$  К (рис. 4, левая колонка) и  $T = 2450$  К (рис. 4, правая колонка). В отличие от рассмотренных выше СПМ (см. рис. 2) АКФ на рис. 4 для всех десяти реализаций НЧ-шума существенно отличаются друг от друга по своим зависимостям от аргумента  $\tau$ . Тем не менее на всех графиках АКФ можно выделить общие закономерности, главной из которых является монотонное убывание АКФ вблизи нулевых значений аргумента  $\tau$  АКФ. Данный участок АКФ представляет наибольший интерес при численном и аналитическом моделировании случайных процессов, поскольку позволяет существенно сузить границы выбора различных видов случайных процессов для математического описания случайного процесса [3–7]. Так, при экспоненциальном спаде АКФ с ростом  $\tau$  наиболее вероятными могут быть импульсные случайные процессы [4], двухуровневые и многоуровневые случайные процессы [3, 19], релаксационные процессы [4–7],  $m$ -связные процессы [18]. Судя по представленным на рис. 1 реализациям НЧ-шума все перечисленные выше виды процессов случайным образом сменяют друг друга или суммируются в той или иной пропорции. Приблизительно экспоненциальный спад АКФ с ростом ее аргумента вблизи нуля наблюдается для усредненных АКФ (рис. 5). Для усреднения были использованы ненормированные АКФ, полученная АКФ нормировалась на среднюю дисперсию.

При линейном спаде АКФ с ростом  $\tau$  наиболее вероятными могут быть процессы с одиночными прямоугольными импульсами [18, 20] и  $m$ -связные процессы с детерминированной заменой составляющих [18].

При больших значениях аргумента  $\tau$  нормированные графики на рис. 4 принимают значения либо близкие к нулю, либо отрицательные. Для количественного описания АКФ были использо-



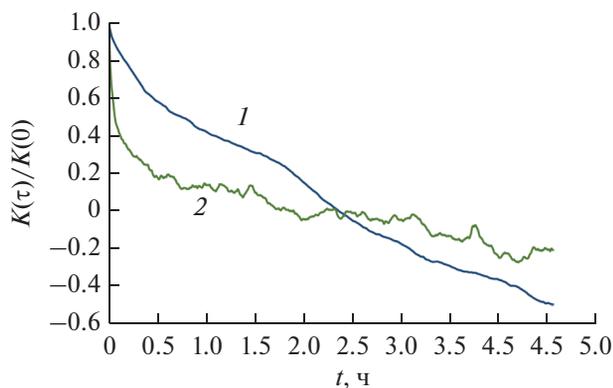
**Рис. 4.** Нормированные автокорреляционные функции, рассчитанные по десяти различным реализациям НЧ-шума при  $U = 148 \text{ В}$ ,  $T = 2250 \text{ К}$  (левая колонка) и  $U = 178 \text{ В}$ ,  $T = 2450 \text{ К}$  (правая колонка).

ваны три характеристики: время корреляции  $\tau_0$ , время положительной корреляции  $\tau_+$  и время антикорреляции  $\tau_-$ . Расчет указанных характеристик проводился согласно следующим формулам:

$$\tau_0 = \int_0^{\max(\tau)} |k(\tau)| d\tau, \tag{4}$$

$$\tau_+ = \int_0^{\max(\tau)}_{k(\tau)>0} k(\tau) d\tau = \int_0^{\max(\tau)} \frac{|k(\tau)| + k(\tau)}{2} d\tau, \tag{5}$$

$$\tau_- = - \int_0^{\max(\tau)}_{k(\tau)<0} k(\tau) d\tau = \int_0^{\max(\tau)} \frac{|k(\tau)| - k(\tau)}{2} d\tau. \tag{6}$$



**Рис. 5.** Нормированные усредненные значения АКФ, полученные при  $U = 148$  В,  $I = 85.6$  мА,  $T = 2250$  К (кривая 1) и при  $U = 178$  В,  $I = 93.9$  мА,  $T = 2450$  К (кривая 2).

В табл. 1 и 2 для температур нагрева 2250 и 2450 К соответственно приведены рассчитанные по данным из рис. 4 и 5 согласно формулам (4), (5) и (6) значения времени корреляции  $\tau_0$ , времени положительной корреляции  $\tau_+$  и времени антикорреляции  $\tau_-$  НЧ-флуктуаций. Относительные неопределенности типа А, при доверительной веро-

ятности 95% равны 24% для времени корреляции при  $T = 2250$  К (см. табл. 1) и 100% для времени корреляции при  $T = 2450$  К (см. табл. 2). Для времен положительной корреляции и антикорреляции для табл. 1 указанные неопределенности равны соответственно 49 и 46%, а для табл. 2 – 135 и 72%. Значения всех времен корреляции, рассчитанные по усредненным АКФ, в пределах погрешности совпадают с их средними арифметическими значениями. Полученные результаты по оценкам неопределенности времени корреляции позволяют сделать вывод о том, что при увеличении температуры нити накала от 2250 до 2450 К нестационарность токовых НЧ-флуктуаций заметно возрастает.

В связи с тем, что дисперсия фликкер-шума зависит от диапазона частот измерения, а в работе использован ограниченный диапазон  $6 \times 10^{-5} \dots 1$  Гц, неопределенности оценок для дисперсий в табл. 1 и 2 не указаны.

Сравнение между собой данных табл. 1 и 2 показывает, что при увеличении температуры нити накала от 2250 до 2450 К уменьшается время корреляции  $\tau_0$  в 2.6 раза, положительной корреляции  $\tau_+$  – в три раза, антикорреляции  $\tau_-$  – в два раза.

**Таблица 1.** Дисперсии и времена корреляции, положительной корреляции и антикорреляции для низкочастотных флуктуаций при  $U = 148$  В и при  $T = 2250$  К

Рисунки	Дисперсия, $A^2$	Время корреляции, с	Время положительной корреляции, с	Время антикорреляции, с
1а, 4а	$1.3 \times 10^{-10}$	$5.7 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$
1в, 4в	$3.2 \times 10^{-10}$	$7.2 \times 10^3$	$5.5 \times 10^3$	$1.6 \times 10^3$
1д, 4д	$1.1 \times 10^{-10}$	$5.0 \times 10^3$	$3.0 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3$
1ж, 4ж	$4.6 \times 10^{-11}$	$8.2 \times 10^3$	$3.6 \times 10^3$	$4.7 \times 10^3$
1и, 4и	$1.4 \times 10^{-10}$	$5.5 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$
По усредненной АКФ	$1.5 \times 10^{-10}$	$5.6 \times 10^3$	$3.4 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$

**Таблица 2.** Дисперсии и времена корреляции, положительной корреляции и антикорреляции для низкочастотных флуктуаций при  $U = 178$  В и  $T = 2450$  К

Рисунки	Дисперсия, $A^2$	Время корреляции, с	Время положительной корреляции, с	Время антикорреляции, с
1б, 4б	$1.7 \times 10^{-10}$	$7.8 \times 10^3$	$5.8 \times 10^3$	$2.0 \times 10^3$
1г, 4г	$3.5 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^3$	$7.5 \times 10^2$	$8.1 \times 10^2$
1е, 4е	$2.3 \times 10^{-10}$	$4.7 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$	$2.6 \times 10^3$
1з, 4з	$2.1 \times 10^{-10}$	$6.6 \times 10^2$	$2.7 \times 10^2$	$3.9 \times 10^2$
1к, 4к	$4.7 \times 10^{-10}$	$2.0 \times 10^3$	$6.9 \times 10^2$	$1.3 \times 10^3$
По усредненной АКФ	$2.8 \times 10^{-10}$	$2.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$	$9.9 \times 10^2$



- тельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019667792. Оpubл. офиц. бюл. “Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем.” № 1 от 20.01.2020.
14. *Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З.* // Измерит. техника. 2021. № 5. С. 18.  
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-18-25>
  15. *Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З.* // Измерит. техника. 2019. № 4. С. 51.  
<https://doi.org/0.32446/0368-1025it.2019-4-51-56>
  16. *Zakharov Y.A., Ghots S.S., Sharipov T.I., Bakhtizhin R.Z.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2119. P. 012139.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2119/1/012139>
  17. *Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И.* Способ измерения температуры нагрева нитей накала осветительных ламп. Пат. РФ № 2765887. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 4 от 04.02.2022.
  18. *Гоц С.С.* Основы описания и компьютерных расчетов характеристик случайных процессов в статистической радиофизике. Уфа: РИО БашГУ, 2005.
  19. *Yi W., Savel'ev S.E., Medeiros-Ribeiro G. et al.* // Nature Commun. 2016. V. 7. № 4. P. 11142.
  20. *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. М.: Физматлит, 2010.