

Мостовой метод исследования спектров токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $1,5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Гц

Юрий Александрович Захаров^{1✉}, Сергей Степанович Гоц², Рауф Загидович Бахтизин³

^{1, 2, 3} Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

¹uriyazakhr2012@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4445-1693>

²gss.0215@yandex.ru

³raouf@bsunet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2970-3362>

Аннотация. Рассмотрена проблема отсутствия методов измерений низкочастотных флуктуационных процессов при высоких температурах. Предложен оригинальный мостовой метод измерения спектров низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала электрических ламп в контролируемом диапазоне температур 300–2700 К. В результате применения мостовой схемы измерений на несколько порядков уменьшено влияние на результаты измерений деградиационных процессов в нитях накала и собственных шумов источников питания. Спектральный анализ низкочастотных флуктуаций тока осуществлён в диапазоне частот $1,5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Гц с помощью автоматизированной установки на базе персонального компьютера под управлением специально разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: вольфрамовая проволока, нити накала, низкочастотные флуктуации, фликкер-шум, металлический проводник

Для цитирования: Захаров Ю. А., Гоц С. С., Бахтизин Р. З. Мостовой метод исследования спектров токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $1,5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Гц // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 18–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-18-25>

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

Yuriy A. Zakharov^{1✉}, Sergey S. Gots², Rauf Z. Bakhtizin³

^{1, 2, 3} Bashkir State University, Ufa, Russia

¹uriyazakhr2012@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4445-1693>

²gss.0215@yandex.ru

³raouf@bsunet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2970-3362>

Abstract. The problem of the absence of methods for measuring low-frequency fluctuation processes at high temperatures is considered. An original bridge method is proposed for measuring the spectra of low-frequency current fluctuations in tungsten filaments of electric lamps in a controlled temperature range of 300–2700 K. Application of the bridge measurement scheme allows us to reduce the influence of degradation processes in the filament and the power source's own noise on the measurement results by several orders of magnitude. Spectral analysis of low frequency current fluctuations is performed at the frequency range $1.5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Hz using an automated setup based on a personal computer under the control of specially developed software.

Keywords: tungsten wire, filaments, low-frequency fluctuations, flicker noise, metal conductor

Введение. В подавляющем большинстве современных радиоэлектронных приборов наблюдаются низкочастотные (НЧ) флуктуации, называемые в зависимости от особенностей их спектров фликкер-шумами (шум типа $1/f$). Спектр НЧ-флуктуаций характеризуется тенденцией к увеличению спектральной плотности мощности (СПМ) с понижением частоты.

В современной вакуумной электронике, электротехнике и астрофизике актуально изучение низкочастотных флуктуационных процессов при высоких температурах. Крайняя ограниченность исследований в данной области связана

с отсутствием соответствующих методов измерений. В ходе разработки адекватных методов измерений необходимо существенно снизить нежелательное влияние на результаты измерений деградиационных процессов в объектах исследований и собственных шумов источников питания.

При изучении спектральных характеристик фликкер-шума отмечаются следующие методические особенности: спектральный анализ проводится на очень низких частотах с высоким разрешением по частоте; задаётся ненулевая нижняя граничная частота; из шумового сигнала вычитается

постоянная составляющая; спектральные характеристики фликкер-шума измеряются длительное время (иногда сотни часов); учитывается влияние деградационных процессов в объекте исследования (особенно в случае измерений НЧ-шума при высоких температурах).

В процессе исследования фликкер-шума возникают методические проблемы. Тракт усиления передаёт шумовые сигналы в очень широкой полосе низких частот. При этом нижние граничные частоты могут составлять тысячные – десятитысячные доли герца. При отображении графиков частотных зависимостей СПМ обычно применяют логарифмический масштаб отображения по частоте. Это позволяет обеспечить достаточно высокую детализацию по частоте в НЧ-области. Если нижняя граничная частота составляет единицы герц и более, то для задания нижней граничной частоты используют разделительные конденсаторы [1] или фильтры верхних частот. На более низких частотах такой метод неприемлем в связи с необходимостью использования конденсаторов с очень большими ёмкостями, что, в свою очередь, способствует нежелательным длительным временам установления переходных процессов. В статье [2] для устранения постоянной составляющей использован метод компенсации постоянной составляющей в шумовом токе или в шумовом напряжении. В настоящей статье предложен альтернативный мостовой метод компенсации постоянной составляющей.

Долгое время экспериментаторы не имели методических возможностей разделения процессов, связанных с деградационными явлениями и фликкер-шумом. Поэтому многие исследователи считали, что фликкер-шум обусловлен деградационными процессами или напрямую связан с ними [3–5]. Авторы настоящей статьи разработали экспериментальный метод разделения фликкер-шумовых и деградационных процессов.

Цель исследования – разработка метода измерений спектров НЧ-флуктуаций тока в макроскопических металлических проводниках, в частности в вольфрамовых нитях накала, в широком контролируемом диапазоне температур 300–2700 К.

Основная проблема изучения НЧ-флуктуаций в макроскопических металлических проводниках – чрезвычайно низкий уровень НЧ-флуктуаций, затрудняющий их экспериментальное исследование известными в настоящее время методами измерения. В связи с этим для практической реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

оценить возможности и недостатки использования существующих экспериментальных методов для помехоустойчивой регистрации НЧ-флуктуаций тока в металлических проводниках, в частности в вольфрамовых нитях накала;

экспериментально исследовать влияние деградационных явлений при измерении спектров НЧ-флуктуаций немостовым методом;

разработать мостовой метод и экспериментальную установку для измерения спектров НЧ-флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала в частотном $1,5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Гц и температурном 300–2700 К диапазонах;

оценить качество и информативность измерений характеристик НЧ-флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала.

Объекты исследования – вольфрамовые нити накала газонаполненных и вакуумных ламп накаливания с номинальным напряжением питания 220–230 В. Выбор объектов исследования обусловлен следующими факторами: возможностью исследований НЧ-флуктуаций в указанном выше температурном диапазоне [6]; возможностью снижения влияния контактных явлений на результаты измерений за счёт использования длинных нитей накала; высоким технологическим уровнем изготовления ламп накаливания на предприятиях, имеющих многолетний опыт производства; сложностью изготовления в лабораторных условиях высококачественных нитей накала; возможностью подбора для мостовой схемы измерений идентичных пар образцов ламп накаливания.

Краткий обзор существующих методов исследования НЧ-флуктуаций тока в металлических проводниках.

Типовые схемы [1, 2], применяемые при исследовании НЧ-флуктуаций тока в проводниках, обладают следующими недостатками: наложением НЧ-шумов источников питания на НЧ-шум объектов исследования; большой постоянной составляющей исследуемого сигнала, подаваемого на измеритель спектра (компенсация данной составляющей на инфрачастотах представляет серьёзную техническую проблему с точки зрения внесения дополнительных шумов и нестабильностей в исследуемый сигнал); отсутствием в измерительных схемах компенсации проявления деградационных процессов в нитях накала при высоких температурах. Вносимые за счёт этих недостатков дополнительные погрешности сопоставимы с соответствующими характеристиками исследуемых флуктуаций или превышают их.

Недостатки типовых схем [1, 2] сложно обнаружить при анализе экспериментальных данных. На первый взгляд, традиционные методы измерений шума можно успешно использовать при измерении характеристик НЧ-флуктуаций. Действительно, в подавляющем большинстве публикаций, посвящённых НЧ-шуму в проводниках [7–9], отмечены достаточно близко воспроизводимые спектры НЧ-флуктуаций $S(f)$ [2, 10–13]:

$$S(f) = S_0 / [1 + (f/f_0)^2]; \quad (1)$$

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

где S_0 – СПМ при частоте $f \ll f_0$; f_0 – частота перегиба на частотной зависимости СПМ; S_1 , γ – коэффициенты аппроксимации СПМ.

С одной стороны, высокая воспроизводимость результатов измерений НЧ-флуктуаций в различных физических системах свидетельствует о достоверности полученных данных. С другой стороны, факт постоянства частотных характеристик спектров НЧ-флуктуаций независимо от вида и характеристик объектов исследований сложно объяснить в рамках тех или иных научных теорий.

Недавние эксперименты, проведённые авторами настоящей статьи с применением двух усовершенствованных

методов исследований НЧ-флуктуаций в вольфрамовых нитях накала [2], позволили существенно уменьшить влияние побочных факторов на результаты измерений. За счёт компенсации постоянной составляющей тока снижено влияние шумов квантования, а за счёт использования ламп накаливания малой мощности с большим номинальным напряжением – влияние контактных разностей потенциалов, тепловых потерь на концах нитей и сопротивления токоподводящих проводов. Метод измерений НЧ-флуктуаций с применением компенсации постоянной составляющей тока подробно описан в работе [2]. Там же приведены некоторые

экспериментальные результаты применения разработанного авторами настоящей статьи мостового метода. Описанию мостового метода измерений НЧ-флуктуаций в металлических проводниках посвящена настоящая статья.

При традиционных методах измерений фликкер-шума в макроскопических металлических проводниках и нитях накала измеренные НЧ-флуктуации некорректно ассоциировать только со случайными процессами в образцах, поскольку на результаты измерений влияют флуктуации напряжения и тока источников питания и деградационные процессы. В методическом плане наибольшую погрешность измерения спектров НЧ-флуктуаций связывают со схемами электропитания исследуемых образцов, что лимитирует возможности исследований НЧ-флуктуаций в макроскопических металлических проводниках.

Разработка мостового метода и экспериментальной установки для измерения спектров НЧ-флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала. Прямая регистрация цифровыми методами небольших значений относительных НЧ-флуктуаций тока в металлических проводниках затруднена из-за постоянной составляющей тока. Указанное затруднение можно устранить методом центрирования исследуемого случайного процесса. Известны четыре способа центрирования случайных процессов: использование разделительных конденсаторов [1] или фильтров верхних частот; вычитание постоянной составляющей тока [2]; вычитание постоянной составляющей напряжения [1]; мостовой метод компенсации постоянной составляющей тока.

В настоящей работе описан четвёртый из указанных выше методов центрирования случайного процесса при измерении НЧ-флуктуаций. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Отличительная особенность предлагаемого мостового метода – применение в обоих плечах моста электрических элементов, представляющих объекты исследования. В качестве электрических элементов использованы две приблизительно идентичные по электрическим характеристикам лампы накаливания, специально отобранные из одной партии. Лампы накаливания выбраны с относительно высоким номинальным напряжением питания 230 В и с относительно невысокой номинальной мощностью 25 Вт. В [6] показано, что для ламп с данными параметрами можно не учитывать сопротивление токоподводящих проводов внутри лампы (никелевых электродов, медных выводов, коваровых вводов, предохранителей).

На рис. 1 измеряемые флуктуации через соединения 7, 8 подавали на вход цифрового мультиметра постоянного тока (мультиметра), работавшего в режиме цифрового регистратора данных. Функциональная схема мультиметра содержала дифференциальный усилитель напряжения, фильтр нижних частот и 16-битный аналого-цифровой преобразователь. Цифровой код с выхода мультиметра через последовательный интерфейс RS-232 подавали на персональный компьютер ПК. Цифровая часть схемы регистрации (серая область внутри пунктирной линии) аналогична опубликованной в [2]. Отличие от [2] состояло в использовании режима измерения напряжения, а не тока.

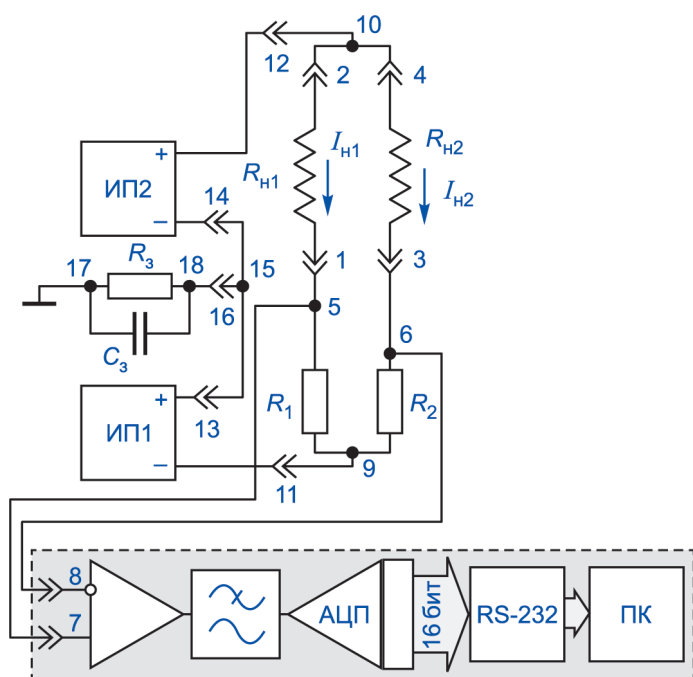


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения мостовым методом токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $1,5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-1}$ Гц:

ИП1, ИП2 – лабораторные блоки питания постоянного тока; R_{H1} , R_{H2} – нити накала ламп; R_1 , R_2 – проволочные нагрузочные резисторы; R_3 – заземляющий резистор; C_3 – заземляющий конденсатор; АЦП – 16-битный аналого-цифровой преобразователь; RS-232 – последовательный интерфейс, выполненный с гальванической развязкой по стандарту RS-232; ПК – персональный компьютер; разъёмные соединения: 1–4 (соединения ламп с патроном), 7–8 (контакты мультиметра), 11–14 (контакты источников питания), 16 (соединение с заземляющим резистором); неразъёмные соединения: 5–6 (измерительная диагональ моста), 9–10 (диагональ питания моста), 15, 17–18

Fig. 1. Functional diagram of an experimental setup for measuring current fluctuations in tungsten filaments in the frequency range $1,5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-1}$ Hz by bridge method:

PS1, PS2 – laboratory DC (direct current) power supplies; R_{FL1} , R_{FL2} – lamp filaments; R_1 , R_2 – wire load resistors; R_{GND} – ground resistor; C_{GND} – ground capacitor; ADC – 16-bit analog-to-digital converter; RS-232 – serial interface, made with galvanic isolation according to the RS-232 standard; PC – personal computer; plug-in connections: 1–4 (connections of lamps to the cartridge), 7–8 (multimeter contacts), 11–14 (power supplies contacts), 16 (connection to ground resistor); permanent connections: 5–6 (measuring diagonal of the bridge), 9–10 (bridge power supply diagonal), 15, 17–18

На рис. 1 проволочные нагрузочные резисторы R_1 , R_2 имели одинаковые сопротивления (в данной установке их сопротивление составляло $19,71 \pm 0,01$ Ом после дополнительной балансировки моста). Дополнительную балансировку моста производили путём параллельного подключения специально подобранного по сопротивлению резистора к тому из резисторов R_1 и R_2 , сопротивление которого больше. Точность балансировки моста проверяли по среднему значению напряжения U_{mV} между точками 5, 6 (максимальная допустимая абсолютная величина U_{mV} зависит от напряжения источника питания и для 210 В примерно равна 6 мВ, а для низких напряжений – 1 мВ). Сопротивления резисторов R_1 , R_2 значительно (от 8 до 100 раз) меньше сопротивлений нитей накала R_{H1} , R_{H2} , а мощность, выделявшаяся на каждом из резисторов R_1 , R_2 , значительно (не менее чем в 80 раз) меньше максимальной мощности, которую они могут рассеивать (около 20 Вт). Это позволяло не учитывать собственные НЧ-флуктуации в резисторах R_1 , R_2 .

Измерительный мост на рис. 1 образовали с помощью элементов R_{H1} , R_{H2} , R_1 , R_2 . Для подачи стабилизированного напряжения на диагональ питания моста (соединения 9 и 10) использовали одинаковые лабораторные блоки питания постоянного тока ИП1, ИП2, соединенные последовательно. Выходное напряжение каждого блока питания регулировали в пределах 0–120 В. Для заземления измерительного контура использовали цепь, состоявшую из резистора R_3 и конденсатора C_3 . Заземляющий резистор R_3 необходим для отвода электростатических потенциалов с участков измерительной схемы, гальванически развязанной от компьютера и контура защитного заземления.

Идентичность по электрическим характеристикам элементов в левом и в правом плечах моста на рис. 1 обеспечивала между точками 5, 6 эффективное подавление флуктуаций напряжений источников питания. В зависимости от точности подбора идентичных элементов плеч моста реальная кратность подавления флуктуаций напряжений источников питания составляла 2–3 порядка. Примерно одинаковый темп деградаций характеристик обеих нитей накала приводил к сохранению баланса моста в процессе длительной многочасовой работы установки. Всё вышеперечисленное способствовало тому, что деградационные процессы не нарушали баланс моста в точках 5, 6 и поэтому не влияли на результаты исследований НЧ-флуктуаций.

Напряжение U_{mV} , измеряемое между точками 5, 6 на рис. 1, равно

$$U_{mV} = R_1 I_{H1} - R_2 I_{H2},$$

где R_1 , R_2 – сопротивления проволочных резисторов; I_{H1} , I_{H2} – токи, проходящие через нити накала R_{H1} , R_{H2} соответственно.

Из последнего уравнения, используя свойства математического ожидания, автокорреляционную и взаимно корреляционную функции соответственно

$$K_{mV}(\tau) = \langle U_{mV}(t) U_{mV}(t + \tau) \rangle - \langle U_{mV}(t) \rangle^2;$$

$$K_{H1, H2}(\tau) = \langle I_{H1}(t) I_{H2}(t + \tau) \rangle - \langle I_{H1}(t) \rangle \langle I_{H2}(t) \rangle,$$

получали

$$K_{mV}(\tau) = R_1^2 K_{H1}(\tau) + R_2^2 K_{H2}(\tau) - R_1 R_2 [K_{H1, H2}(\tau) + K_{H1, H2}(\tau)],$$

где $K_{mV}(\tau)$, $K_{H1}(\tau)$, $K_{H2}(\tau)$ – автокорреляционные функции для процессов $U_{mV}(t)$, $I_{H1}(t)$, $I_{H2}(t)$ соответственно; $K_{H1, H2}(\tau)$, $K_{H2, H1}(\tau)$ – взаимно корреляционные функции; угловые скобки обозначают усреднение по времени.

Используя линейность преобразования Фурье, теорему Винера-Хинчина для автокорреляционных функций и СПМ, аналогичное соотношение для взаимно корреляционных функций и взаимного энергетического спектра [14], а также свойства взаимного энергетического спектра [14], СПМ $S(f)$ флуктуаций U_{mV} рассчитывали по формуле

$$S(f) = S_1(f) R_1^2 + S_2(f) R_2^2 - 2 S_{12}(f) R_1 R_2, \quad (3)$$

где $S_1(f)$, $S_2(f)$ – соответственно СПМ флуктуаций тока в нитях накала R_{H1} , R_{H2} ; $S_{12}(f)$ – действительная часть взаимного энергетического спектра [3] флуктуаций тока в нитях накала.

Если $R_1 \approx R_2$, выражение (3) принимает вид

$$S(f) = S_1(f) R_1^2 + S_2(f) R_1^2 - 2 S_{12}(f) R_1^2. \quad (4)$$

При проведении измерений наибольший интерес представляет рассмотрение двух частных случаев (4).

1. Измерение НЧ-флуктуаций естественного происхождения. Априори можно полагать, что за счёт идентичности нитей накала $S_1(f) \approx S_2(f)$ в силу отсутствия взаимной корреляции НЧ-флуктуаций в нитях накала $S_{12}(f) \approx 0$. Это позволяет переписать (4) следующим образом:

$$S(f) = 2 S_1(f) R_1^2 = 2 S_2(f) R_1^2. \quad (5)$$

2. Измерение НЧ-флуктуаций, обусловленных внешними воздействиями на лампы накаливания. В этом случае коэффициент взаимной корреляции флуктуаций в нитях накала равен 1. Поэтому $S_{12}(f) \approx S_1(f) \approx S_2(f)$ и $S(f) = 0$.

Это означает отсутствие влияния внешних помех (электромагнитных и гравитационных полей, вибрационных воздействий на установку, флуктуаций температуры окружающей среды и т. п.) на результат измерения.

Таким образом, применение мостовой схемы подключения исследуемых ламп к источникам питания и к измерительному прибору позволяет на 2–3 порядка снизить влияние шумов и нестабильностей источников питания на результаты измерений НЧ-флуктуаций в нитях накала. Мостовая схема измерения НЧ-флуктуаций обеспечивает устранение влияния деградационных процессов в нитях накала, а также электромагнитных и гравитационных полей, вибрационных воздействий на установку, флуктуации температуры окружающей среды.

Оценка качества и информативности измерения характеристик НЧ-флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала. В качестве примера рассмотрим

несколько реализаций НЧ-флуктуаций при одинаковом напряжении источника питания $U_{\text{ИП}} = 210$ В (соответствует температуре нити накала примерно 2700 К). Для уменьшения влияния температурных дрейфов напряжений и токов перед началом измерений производили длительный (не менее 30 минут) прогрев установки и объекта исследований в заданном режиме работы.

На рис. 2 кривые 1–5 соответствуют пяти центрированным реализациям флуктуаций тока

$$I(t) = (U_{mV} - \langle U_{mV} \rangle) / (\sqrt{2}R_1)$$

в нитях накала, рассчитанным через напряжение U_{mV} , снятое между точками 5, 6 измерительного моста на схеме рис. 1, и усреднённое по времени напряжение $\langle U_{mV} \rangle$.

В процессе вывода формулы для флуктуаций тока, измеренных мостовым методом по схеме рис. 1, учитывалось,

что при использовании мостовой схемы для дисперсий флуктуаций напряжения U_{mV} и тока I_{H1} выполнялось аналогичное формуле (5) соотношение. Из-за приближённого равенства $R_1 \approx R_2$ значение $I(t)$ получалось смещённым по постоянной составляющей. В связи с этим в процессе цифровой обработки $I(t)$ осуществлялось дополнительное центрирование процесса для исключения постоянной составляющей смещения. Оценивалась переменная составляющая смещения, оказавшаяся примерно в 10 раз меньше инструментальной погрешности.

Проводилось сравнение полученных спектров НЧ-флуктуаций с известными математическими моделями НЧ-шума (m -связные последовательности [4], бинарный сигнал [4], модель m -уровневого сигнала [15]). На реализациях низкочастотных флуктуаций тока, показанных на рис. 2, выделялись следующие характерные виды изменения тока от времени: экспоненциальные импульсные случайные процессы (которым соответствует СПМ вида спектра Лоренца); прямоугольные импульсные случайные процессы

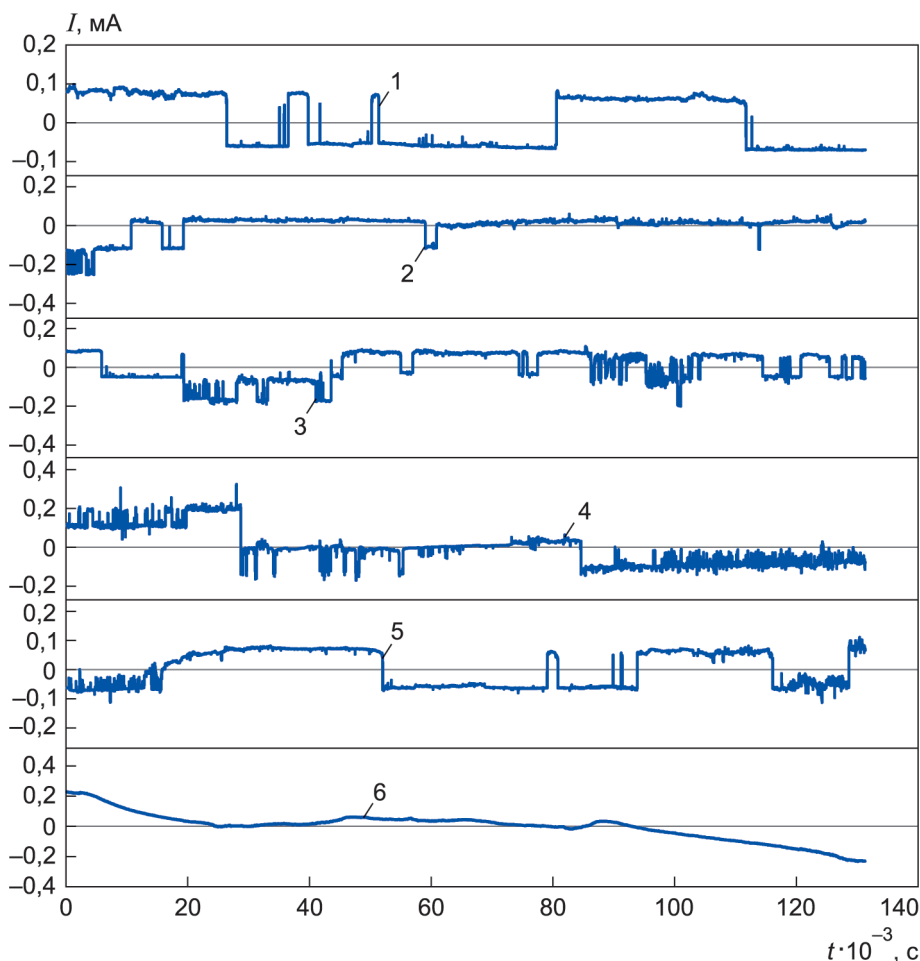


Рис. 2. Центрированные реализации $I(t)$ НЧ-флуктуаций тока, рассчитанные через напряжение U_{mV} , измеренное между точками 5 и 6 на схеме рис. 1 (кривые 1, 2, 3, 4, 5), и реализация $I(t)$ низкочастотных флуктуаций тока, измеренная методом компенсации постоянной составляющей напряжения (кривая 6)

Fig. 2. Centered implementations of $I(t)$ low-frequency current fluctuations, calculated using voltage U_{mV} , measured between points 5 and 6 in the diagram in fig. 1 (curves 1, 2, 3, 4, 5), and implementation of $I(t)$ low-frequency current fluctuations measured by method of compensation of the constant component of the voltage (curve 6)

импульсные случайные процессы [4] (см. кривые 1–5, например, участок $5,01 \cdot 10^4 \text{ с} \leq t \leq 5,12 \cdot 10^4 \text{ с}$ с кривой 1 или участок $t \approx 1,14 \cdot 10^5 \text{ с}$ с кривой 2); ступенчатые случайные процессы [4, 15] (см. кривую 4 при $t \approx 2,86 \cdot 10^4 \text{ с}$ и $t \approx 8,44 \cdot 10^4 \text{ с}$); квазипрерывные случайные процессы [4] (см. участок $1,93 \cdot 10^4 \text{ с} \leq t \leq 5,86 \cdot 10^4 \text{ с}$ с кривой 2).

Все указанные виды импульсных и ступенчатых случайных процессов непредсказуемы по времени их появления, по длительности протекания во времени, по амплитуде импульсов. Для сравнения НЧ-флуктуационных процессов с деградационными процессами также проводились измерения с использованием метода компенсации постоянной составляющей напряжения. В этом случае лампа накаливания R_{H2} отключалась от схемы (с разрывом соединения 3–4), а резистор R_1 заменялся на другой проволочный резистор R с сопротивлением около 100 Ом. Контакт 9 соединялся с разъемом «–» малошумящего источника опорного напряжения (около 9,6 В), разъем «+» указанного опорного источника соединялся с разъемом 8 мультиметра, а провод, идущий от контакта 6, отключался от разъема 8. Напряжения источников питания ИП1, ИП2 регулировались, чтобы напряжение, измеряемое вольтметром, было минимальным (по абсолютному значению). В этом случае влияние флуктуаций напряжения источников питания и деградационных процессов в лампе не устранялось. Использование метода компенсации напряжения, а не тока [2] обусловлено тем, что шумы источника опорного напряжения, работающего в режиме холостого хода, значительно

меньше шумов источника питания, включенного с нагрузкой. На кривой 6 рис. 2 показана полученная центрированная реализация флуктуаций тока

$$I(t) = (U_{mV} - \langle U_{mV} \rangle) / R,$$

где U_{mV} – напряжение, снимаемое между точками 7, 8.

Замечено, что реализация флуктуаций тока (см. рис. 2, кривая 6) квазинепрерывной формы, а импульсные случайные процессы на указанной реализации чётко не проявлены. Кроме этого, на кривой 6 рис. 2 отмечен однонаправленный тренд изменения тока, обусловленный деградационными процессами в нитях накала. В связи с тем, что при высоких температурах деградационные процессы в лампах значительно интенсивнее НЧ-флуктуаций, для обнаружения деградационных процессов не потребовалась компенсация шумов источников питания.

Для расчёта СПМ $S(f)$ флуктуаций напряжения U_{mV} использована программа «Расчёт СПМ» [Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667792. Расчёт СПМ (с фильтрацией спектральной плотности мощности) / Захаров Ю. А., Гоц С. С. Заявка № 2019666742 пост. 16.12.2019, рег. 27.12.2019]. К центрированным процессам применено быстрое преобразование Фурье. Из (5) получена формула для пересчёта СПМ флуктуаций напряжения U_{mV} между точками 5, 6 на рис. 1 в СПМ флуктуаций тока $I(t)$:

$$S_1(f) = S(f) / (2R_1^2).$$

Для пересчёта СПМ флуктуаций напряжения U_{mV} , измеренного методом компенсации постоянной составляющей напряжения, в СПМ флуктуаций тока $I(t)$ использована линейность преобразования Фурье.

На рис. 3, а, б приведены графики частотных зависимостей исходных и сглаженных СПМ флуктуаций тока. Кривая 1 на рис. 3 соответствует СПМ, усреднённой по пяти СПМ, рассчитанным по кривым 1–5 на рис. 2. Кривая 2 на рис. 3 соответствует СПМ, рассчитанной на основе одной кривой 6 на рис. 2. У частотных зависимостей СПМ 1 отмечена характерная для флуктуационных процессов стохастическая составляющая [16] частотной зависимости, наложенная на трендовую составляющую вида (1) или вида (2). Стохастическая составляющая частотной зависимости СПМ 2 (см. рис. 3) существенно меньше аналогичной составляющей зависимости 1. Этот факт свидетельствует о преобладающем проявлении детерминированных деградационных, а не случайных флуктуационных процессов на реализации, измеренной методом компенсации постоянной составляющей напряжения.

Для удобства анализа частотные зависимости СПМ сглажены по частоте. Исходные зависимости СПМ приведены на рис. 3, а, а сглаженные – на рис. 3, б. Для сглаживания использован рекурсивный цифровой фильтр нижних частот первого порядка, алгоритм которого рассмотрен в [2] и реализован в программе «Расчёт СПМ».

Сглаживание частотных зависимостей СПМ практически не повлияло на оценку величины индекса СПМ: индекс СПМ (см. формулу (2)) $\gamma = 1,8$ и $2,0$ соответственно для кривых 1, 2

(см. рис. 3). Значение γ для усреднённой СПМ рассчитывали в программе «Расчёт СПМ» с помощью взвешенного метода наименьших квадратов.

Относительная неопределённость типа А (см. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения», ГОСТ Р 8.736-2011 «ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения») оценки индекса СПМ γ не превышала 6 %. Относительная неопределённость оценки индекса СПМ γ типа В (см. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC) находилась в пределах 0,3–0,8 %. Существенное превышение случайных погрешностей над систематическими авторы настоящей статьи связывают с квазистационарным характером НЧ-флуктуаций в нитях накала [4].

Таким образом, применение мостовой схемы измерений НЧ-флуктуаций в нитях накала обеспечивает надёжную

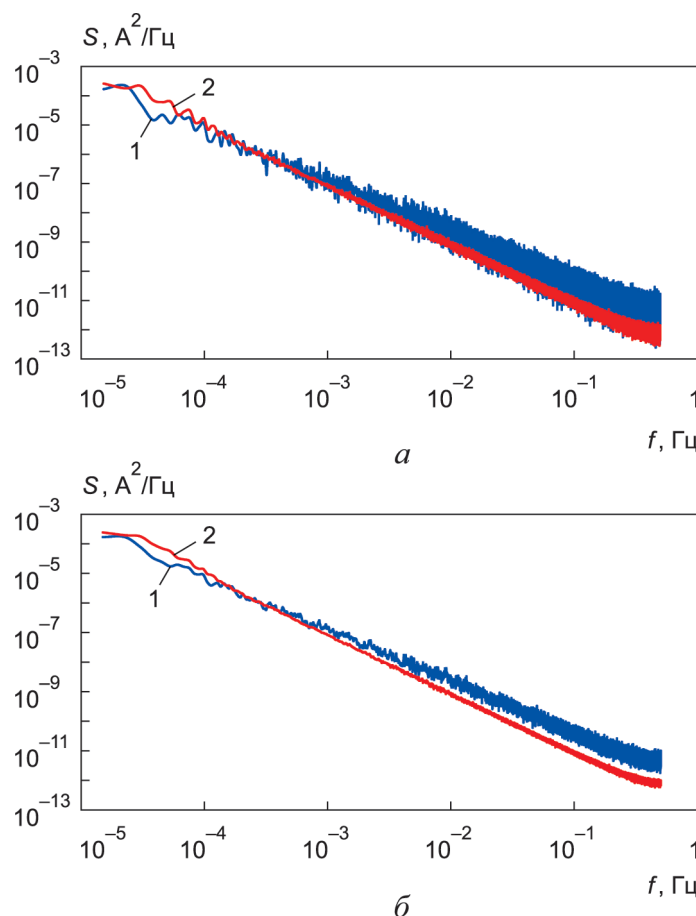


Рис. 3. Исходные (а) и сглаженные (б) спектральные плотности мощности низкочастотных флуктуаций тока в нитях накала, измеренные разными методами: мостовым методом по схеме измерений на рис. 1 (кривая 1), методом компенсации постоянной составляющей напряжения (кривая 2)

Fig. 3. Initial (a) and smoothed (b) spectral power densities of low-frequency current fluctuations in the filaments, measured by different methods: by bridge method according to measurement scheme in fig. 1 (curve 1); by method of compensation of the constant component of the voltage (curve 2)

регистрацию и спектральный анализ случайных процессов различных видов, а также эффективное нивелирование деградационных процессов. Частотные зависимости СПМ НЧ-флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала при высокой (2700 К) температуре аппроксимируются зависимостями видов (1), (2) и согласуются с математическими моделями, рассмотренными ранее в [4, 15]. Относительная неопределённость оценки значений индекса СПМ флуктуаций тока в нитях накала не превышает 6 %.

Заключение. Оценка существующих экспериментальных методов помехоустойчивой регистрации НЧ-флуктуаций тока в металлических проводниках, в частности в вольфрамовых нитях накала, показала, что при традиционных методах на измеренные НЧ-флуктуации в нитях накала оказывают влияние флуктуации напряжения и тока источников питания, а также деградационные процессы в нитях накала. Разработанный авторами настоящей статьи мостовой метод и созданная экспериментальная установка для измерения спектров НЧ-флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала в диапазонах частот $1,5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Гц и температур 300–2700 К позволили устранить влияние деградационных процессов в нитях накала и флуктуаций в источниках питания. При этом обеспечен отдельный анализ фликкер-шумовых и деградационных процессов в вольфрамовых нитях накала.

Проведённая оценка качества и информативности измерений характеристик НЧ-флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала показала, что при использовании мостовой схемы измерений НЧ-флуктуаций можно регистрировать различные по своей природе случайные процессы в нитях накала.

Предложенный мостовой метод измерения флуктуаций в нитях накала можно использовать для устранения влияния флуктуаций источников питания и деградационных процессов в объектах исследования при экспериментальном исследовании низкочастотных флуктуаций в проводниках и в нитях накала, для имитационного моделирования в лабораторных условиях долговременных нестабильностей и флуктуационных процессов, происходящих при высоких температурах (в том числе – на Солнце и в звёздных системах [17–19]), а также при организации ускоренных испытаний и оценки надёжности и долговечности различных электротехнических изделий и радиотехнических элементов, функционирование которых сопровождается нагревом проводников электрическим током.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках государственного задания на 2021–2024 гг., тема № FZWU-2021-0009 «Комплексные исследования физико-химических процессов образования функциональных наноструктур в конденсированных средах при комбинированных внешних воздействиях».

Список литературы

1. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. Пер. с англ. / Под ред. А. К. Нарышкина. М.: Мир, 1979. 296 с.

2. Захаров Ю. А., Гоц С. С., Бахтизин Р. З. Исследование спектра низкочастотных токовых флуктуаций в нитях накала электрических ламп // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 3. С. 250–265.

3. Степанов А. В. Прямое измерение неравновесного шума // Материалы докладов 42 Международного научно-методического семинара «Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах», Москва, 28–30 ноября 2011. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, МЭИ, 2012. С. 49–55.

4. Гоц С. С. Основы описания и компьютерных расчётов характеристик случайных процессов в статистической радиофизике. Уфа: РИО БашГУ, 2005. 168 с.

5. Горлов М. И., Смирнов Д. Ю., Золотарева Е. А. Способы разделения полупроводниковых приборов по надёжности с использованием низкочастотного шума и рентгеновского облучения // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 1. С. 52–56.

6. Захаров Ю. А., Гоц С. С., Бахтизин Р. З. Метрологические аспекты измерения среднеобъёмной температуры нитей накала в осветительных лампах // Измерительная техника. 2019. № 4. С. 51–56.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-4-51-56>

7. Neri B., Ciofi C., Dattilo V., *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, vol. 44, no. 9, pp. 1454–1459.
<https://doi.org/10.1109/16.622601>

8. Жигальский Г. П. Неравновесный $1/f^\gamma$ -шум в проводящих пленках и контактах // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 5. С. 465–490.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200305a.0465>

9. Бахтизин Р. З., Гоц С. С. Установка для исследования низкочастотного шума автоэмиссионных катодов // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 3. С. 136–138.

10. Wittrock S., Tsunegi S., Yakushiji K., Fukushima A., Kubota H., Bortolotti P., Ebels U., Yuasa S., Cibiel G., Galliou S., Rubiola E., Cros V., *Phys. Rev. B*, 2019, vol. 99, no. 23, 235135.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.235135>

11. Aliev F. G., Cascales J. P., Hallal A., Chshiev M., Andrieu S., *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 112, no. 21, 216801.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.216801>

12. Chitame C., McLachlan D. S., Balberg I., *Phys. Rev. B*, 2003, vol. 67, no. 2, 024207. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.024207>

13. Guerrero R., Solignac A., Pannetier-Lecoeur M., Apertet Y., Lecoeur P., Fermon C., *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 82, no. 3, 035102.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.035102>

14. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. 464 с.

15. Ghos S. S., Bakhtizin R. Z., *Applied Surface Science*, 2003, vol. 215, no. 1–4, pp. 105–112.
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00314-3)

16. Тимашев С. Ф., Поляков Ю. С., Лакеев С. Г., Мусурин П. И., Данилов А. И. Принципы флуктуационной метрологии // Журнал физической химии. 2010. Т. 84. № 10. С. 1980–2000.

17. Périgois C., Belczynski C., Bulik T., Regimbau T., *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 103, no. 4, 043002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.043002>

18. Polnarev A. G., Roxburgh I. W., Baskaran D., *Phys. Rev. D*, 2009, vol. 79, no. 8, 082001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.79.082001>

19. Edlund J. A., Tinto M., Królak A., Nelemans G., *Phys. Rev. D*, 2005, vol. 71, no. 12, 122003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.122003>

References

1. Van der Ziel A., *Noise in measurements*, John Wiley & Sons, New York, 1976, 228 p.

2. Zakharov Yu. A., Gots S. S., Bakhtizin R. Z., *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 227–240.
<https://doi.org/10.1007/s11141-021-10048-0>

3. Stepanov A. V., Direct measurement of non equilibrium noise, *Proceedings of the scientific and methodological seminar reports "Fluctuation and degradation processes in semiconductor devices"*, Moscow, Russia, November 28–30, 2011, Moscow, Popov MSTSREEC, MPEI, 2012, pp. 49–55. (In. Russ.)

4. Gots S. S. *Osnovy opisaniya i komp'yuternyh raschetov harakteristik sluchajnyh processov v statisticheskoy radiofizike [Fundamentals of description and computer calculations of characteristics of random processes in statistical radiophysics]*, Ufa, Editorial and publishing department of Bashkir state university, 2005, 168 p. (In. Russ.)

5. Gorlov M. I., Smirnov D. Y., Zolotareva E. A., *Russian microelectronics*, 2011, vol. 40, no. 1, pp. 47–51.
<https://doi.org/10.1134/S1063739710061010>

6. Zakharov Yu. A., Gots S. S., Bakhtizin R. Z., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 358–364.
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01630-0>

7. Neri B., Ciofi C., Dattilo V., *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, vol. 44, no. 9, pp. 1454–1459.
<https://doi.org/10.1109/16.622601>

8. Zhigalskii G. P., *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2003, vol. 46, no. 5, pp. 449–471.
<https://doi.org/10.1070/PU2003v046n05ABEH001244>

9. Bakhtizin R. Z., Gots S. S., *Ustanovka dlja issledovaniya nizkochastotnogo shuma avtoemissionnyh katodov [Apparatus for measuring low-frequency noise of field-emission cathodes]*, *Instruments and Experimental Techniques*, 1981, vol. 24, no. 3, pp. 711–713. (In. Russ.)

10. Wittrock S., Tsunegi S., Yakushiji K., Fukushima A., Kubota H., Bortolotti P., Ebels U., Yuasa S., Cibiel G., Galliou S., Rubiola E., Cros V., *Phys. Rev. B*, 2019, vol. 99, no. 23, 235135.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.235135>

11. Aliev F. G., Cascales J. P., Hallal A., Chshiev M., Andrieu S., *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 112, no. 21, 216801.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.216801>

12. Chiteme C., McLachlan D. S., Balberg I., *Phys. Rev. B*, 2003, vol. 67, no. 2, 024207.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.024207>

13. Guerrero R., Solignac A., Pannetier-Lecoeur M., Apertet Y., Lecoeur P., Fermon C., *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 82, no. 3, 035102.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.035102>

14. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]*, Moscow, Higher school publ., 2000, 464 p. (In. Russ.)

15. Gots S. S., Bakhtizin R. Z., *Applied Surface Science*, 2003, vol. 215, no. 1–4, pp. 105–112.
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00314-3)

16. Timashev S. F., Polyakov Yu. S., Lakeev S. G., Misurkin P. I., Danilov A. I., *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2010. vol. 84, no. 10, pp. 1807–1825.
<https://doi.org/10.1134/S0036024410100183>

17. Périgois C., Belczynski C., Bulik T., Regimbau T., *Phys. Rev. D*, 2021, vol. 103, no. 4, 043002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.043002>

18. Polnarev A. G., Roxburgh I. W., Baskaran D., *Phys. Rev. D*, 2009, vol. 79, no. 8, 082001.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.79.082001>

19. Edlund J. A., Tinto M., Królak A., Nelemans G., *Phys. Rev. D*, 2005, vol. 71, no. 12, 122003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.122003>

Статья поступила в редакцию 03.09.2020; принята к публикации 15.02.2021.