УДК 621.391.822.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ТОКОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В НИТЯХ НАКАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП

Ю. А. Захаров*, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин

Башкирский госуниверситет, г. Уфа, Россия

В диапазонах частот 2, $5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-1}$ Гц и температур 1 260÷2 600 К экспериментально исследованы спектральные характеристики низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала осветительных ламп. Для уменьшения влияния краевых эффектов и повышения точности измерений использовалось вычитание (компенсация) постоянной составляющей тока. Применение специальных схем позволило существенно снизить влияние собственных шумов источников, используемых для питания нитей накала. Установлено, что низкочастотные токовые флуктуации представляют собой случайно чередующуюся во времени совокупность четырёх случайных процессов: релаксационных, импульсных, ступенчатых и квазинепрерывных. Показано, что во всём диапазоне исследованных частот относительные флуктуации не превышают значений $3 \cdot 10^{-4}$, а частотная зависимость спектральной плотности мощности хорошо аппроксимируется функцией вида $1/f^{\gamma}$ с индексом γ в пределах ($1,6\div1,8$) \pm 0,2. Исследована зависимость параметров спектральной плотности мощности низкочастотных токовых флуктуаций от среднего значения тока и средней по объёму температуры. Обнаруженные особенности низкочастотных флуктуаций авторы связывают с электронными, атомарными и деградационными процессами в нитях накала.

введение

Низкочастотные (НЧ) токовые флуктуации [1], называемые фликкер-шумом или избыточным НЧ шумом, обнаруживаются во многих физических и природных системах. Впервые фликкершум был обнаружен Джонсоном [2] в 1925 году при исследовании токового шума в электровакуумных лампах. В его экспериментах было установлено, что на относительно высоких частотах вплоть до верхней граничной частоты $f_{\rm Sh}$ спектральная плотность мощности (СПМ) дробового шума была частотно-независимой (см. рис. 1, область 3). Однако с уменьшением частоты fниже некоторой величины f_1 СПМ флуктуаций тока начинала возрастать с приблизительной частотной зависимостью вида $1/f^2$ (см. рис. 1, область 2). Шумы ниже частоты f_1 стали называть избыточными НЧ шумами или фликкер-шумом.

Для различных термоэмиссионных приборов и режимов их работы величина f_1 обычно меняется в пределах $10^1 \div 10^4$ Гц. Верхняя граничная частота, или частота среза дробового шума, $f_{\rm Sh}$ для различных термоэмиссионных приборов имеет величину порядка сотен мегагерц и зависит от пролётного времени электронов от катода к аноду.

В 1926 году Шоттки [3] предложил теорию, объясняющую фликкер-шум случайным изменением эмиссионной способности отдельных областей катода за счёт миграции по его поверхности адатомов остаточных газов. На основе аналитических расчётов им была получена формула

$$S(f) = \frac{S_0}{1 + (f/f_0)^2},\tag{1}$$

где S(f) — СПМ фликкер-шума, S_0 — константа аппроксимации, f_0 — частота перегиба СПМ фликкер-шума. В связи с методическими проблемами спектрального анализа аналоговыми методами на частотах ниже 1 Гц значение f_0 было приблизительно оценено по порядку величины

^{*} uriyzakhr2012@yandex.ru





Рис. 1. Схематическое изображение спектральных характеристик флуктуаций тока в термоэмиссионных приборах: 1 — плато фликкер-шума, 2 — f^{-2} -тренд, 3 — плато дробового шума, 4 — f^{-k} -тренд

Рис. 2. Схематическое изображение спектральных характеристик флуктуаций тока в полупроводниковых приборах: 1 - плато f^{γ} -шума, $2 - f^{-\gamma}$ тренд, 3 - плато дробового шума, $4 - f^{-k}$ -тренд

лишь к середине 1950-х годов и оказалось для различных эмиссионных приборов в пределах $10^{-1} \div 10^{-3}$ Гц.

Начиная с 50-х годов центр интересов по изучению НЧ шума был перенесён на полупроводниковую электронику. Было обнаружено, что в отличие от термоэмиссионных приборов в полупроводниках частотная зависимость СПМ хорошо аппроксимируется степенной функцией вида

$$s(f) = S_0 / f^{\gamma},\tag{2}$$

где S_0 и γ — коэффициенты аппроксимации [4, 5], причём индекс СПМ γ чаще всего лежит в интервале значений от 0,9 до 1,5. В связи с тем, что в пределах экспериментальных погрешностей индекс СПМ часто оказывается близким к единице, шум вида (2) называют 1/f-шумом. Обычно считается, что зависимость (2) имеет место в диапазоне частот от f_0 до f_1 (см. рис. 2). Выше верхней граничной частоты f₁ зависимость (2) может нарушаться как из-за изменения параметра γ , так и из-за маскировки фликкер-шума естественными шумами (тепловым и дробовым) объекта исследования и шумами цифрового измерительного прибора (шумы квантования, элайзинг). Нижняя граничная частота f_0 может быть оценена в предположении, что величина f_0^{-1} не может превышать времени жизни объекта исследования. На рис. 2 показана маскировка 1/f-шума дробовым шумом (область 3). Заметим, что для 1/f-шума ниже частоты перегиба f_0 участок СПМ (область 1) не обязательно должен быть частотно-независимым, а может характеризоваться той или иной зависимостью от частоты. Аналогично для дробового шума участок его СПМ выше частоты перегиба $f_{\rm Sh}$ может иметь иную зависимость от частоты по сравнению с указанной на рис. 2. Попутно отметим, что для большинства исследованных физических объектов экспериментально пока так и не определены частоты перегиба: f_0 для 1/f-шума и $f_{\rm Sh}$ для дробового шума.

В самой первой теории 1/f-шума, предложенной в 1950-х годах Мак-Уортером и Ван дер Зилом [4], фликкер-шум в транзисторах на основе структуры металл—оксид—полупроводник объясняется захватом неравновесных зарядов медленными поверхностными состояниями, локализованными в оксидном слое на поверхности кремния. Эти состояния имеют широкое распределение времён жизни. Ван дер Зил показал, что спектр вида $1/f^{\gamma}$ в ограниченном диапазоне частот можно получить при взвешенном суммировании большого количества лоренцевских спектров вида (1), имеющих различные времена релаксации [4]. Если распределение времени релаксации τ_0

имеет вид

$$w(\tau_0) = A/\tau_0^{\chi} \tag{3}$$

где $A = \text{const}, \chi = \text{const},$ то индекс γ СПМ $1/f^{\gamma}$ -шума имеет значение [5]

$$\gamma = 2 - \chi. \tag{4}$$

В однородных материалах 1/f-шум обусловлен флуктуациями сопротивления, не зависящими от прохождения тока через образец, т. е. является равновесным шумом [6]. В этом случае СПМ флуктуаций тока I имеет следующий вид (формула Хоухе) [7, 8]:

$$S_I(f) = \frac{\langle I \rangle^2 \alpha}{Nf},\tag{5}$$

где $\langle I \rangle$ — среднее значение тока через резистор, α — безразмерный коэффициент Хоухе, обычно приблизительно равный $2 \cdot 10^{-3}$, N — количество свободных носителей заряда.

В более общем случае СПМ фликкер-шума можно аппроксимировать с помощью степенной функции [1]

$$S_I(f) = A_0 \,\frac{\langle I \rangle^\lambda \alpha}{N f^\gamma},\tag{6}$$

где $A_0 = 1 \,\mathrm{A}^{2-\lambda} \,\mathrm{c}^{\gamma-1}$ — вспомогательный коэффициент аппроксимации.

За последние десятилетия опубликовано много статей, в которых рассмотрены различные модели $1/f^{\gamma}$ -шума в твёрдых телах [9], в частности в металлических и резистивных плёнках [6].

В [10, 11] рассмотрен механизм возникновения $1/f^2$ -шума, связанный с тем, что при наличии взаимодействия (кулоновского, Ферми, рассеяния) относительно небольшой части электронов проводимости возможна трансформация дробового шума в избыточный НЧ шум со спектром Лоренца (1). В отличие от «атомарной» модели НЧ шума [3], в [11] использована «электронная» модель НЧ шума, которая базируется на математической модели *m*-связных последовательностей. Эта модель использована для оценки времени корреляции τ и расчёта СПМ избыточного НЧ шума (а не дробового шума) в приближении сильно коррелированных свободных электронов. В работе [12] для вольфрамовых термокатодов была экспериментально получена частотная зависимость СПМ S(f) избыточного НЧ шума и показано, что S(f) хорошо описывается выражением вида (1). Проведена экспериментальная и математическая оценка частоты перегиба f_0 , которая по порядку величины оказалась равной 10^{-1} Гц.

Учёт кулоновского взаимодействия электронов проводимости и электрон-фононного рассеяния [13] в макроскопических металлических образцах позволяет оценить порядок величины m связанности электронов и частоту перегиба f_0 в формуле (1). Электрон-фононное рассеяние уменьшает m, а кулоновское взаимодействие — увеличивает. Следует, однако, учесть, что НЧ флуктуации могут быть обусловлены другими механизмами, например миграционными процессами и испарением атомов металла. Особенно вероятен этот механизм формирования НЧ флуктуаций при высоких температурах. В связи с этим в научной литературе считается, что при формировании НЧ флуктуаций в макроскопических образцах роль электронных механизмов пренебрежимо мала.

Таким образом, изучение избыточных НЧ флуктуаций в металлах крайне интересно не только в прикладном, но и в фундаментальном аспекте развития физики металлов. К сожалению, подобные исследования до последнего времени проводились только в областях эмиссионной электроники и физики тонких плёнок [6, 14]. Основной проблемой при проведении таких исследований является то, что в макроскопических металлических образцах чрезвычайно низок уровень НЧ

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин

флуктуаций, что до последнего времени (до 2019 года) делало их недоступными для экспериментального исследования. Особый интерес именно к макроскопическим, а не к мезоскопическим металлическим образцам обусловлен тем, что для уменьшения влияния тепловых потерь на концах проводника, контактных разностей потенциалов и сопротивления токоподводящих проводов нужно использовать достаточно длинные и тонкие проволоки [15]. Заметим, что до настоящего времени так никому и не удалось корректно обнаружить и измерить спектральные характеристики НЧ токовых флуктуаций в макроскопических металлических образцах. В связи с этим в данной работе развиты специальные методы проведения экспериментальных исследований НЧ флуктуаций в макроскопических образцах.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является экспериментальное исследование низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала осветительных ламп накаливания в диапазоне температур 1260÷2600 К.

Объектами исследования являются вольфрамовые нити накала газонаполненных ламп накаливания с номинальным напряжением питания 220÷230 В. Выбор объектов исследования обусловлен необходимостью защиты вольфрама от окисления и испарения при высоких температурах, а также чрезвычайно высоким технологическим уровнем изготовления ламп накаливания на ведущих предприятиях, имеющих вековой опыт производства. Заметим, что в лабораторных условиях очень сложно и несопоставимо дорого пытаться изготовить металлическую проволоку, имеющую большу́ю длину ($L_{\rm HH} \approx 12$ м), малое поперечное сечение ($S_{\rm HH} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ мм²) и высокую стабильность (относительно малую деградацию за время проведения эксперимента) при высокой температуре в течение десятков и сотен часов. Кроме того, следует отметить практически полное отсутствие изученности низкочастотных флуктуаций в металлических образцах, особенно в области высоких температур, а также высокий уровень интереса к этому вопросу в радиоэлектронике как в научном, так и в прикладном аспекте.

Следует отметить, что выполненные на основе металлической проволоки различные радиоэлектронные элементы (проволочные резисторы, бареттеры, нити накала радиоламп) характеризуются очень низким уровнем относительных флуктуаций, что затрудняет их экспериментальное исследование известными в настоящее время методами измерения, в том числе и цифровыми [16]. В связи с этим для практической реализации поставленной цели предстояло решить следующие задачи.

1) Разработать и создать автоматизированную экспериментальную установку для измерения спектральных характеристик низкочастотных флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $2.5 \cdot 10^{-4} \div 5.0 \cdot 10^{-1}$ Гц и в диапазоне температур $1260 \div 2600$ К.

2) Провести измерения спектральных характеристик низкочастотных флуктуаций тока в макроскопических вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $2.5 \cdot 10^{-4} \div 5.0 \cdot 10^{-1}$ Гц и в диапазоне температур $1260 \div 2600$ К.

3) Провести анализ полученных результатов исследований низкочастотных флуктуаций в вольфрамовых нитях накала для установления наиболее вероятных механизмов их возникновения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 3 показана одна из схем экспериментальной установки для измерения низкочастотных флуктуаций тока методом компенсации постоянной составляющей. Серая область внутри пунктирной линии в верхней части рисунка соответствует участку электрической цепи в колбе лампы накаливания. Вольфрамовая нить накала обозначена резистором R, токопроводящие высокотемпературные никелевые электроды — резисторами R_1 и R_2 , токопроводящие среднетемпературные медные выводы — резисторами R_3 и R_4 , герметичный коваровый ввод — резистором R_5 , встроенный предохранитель с коваром — резистором R_6 [17]. Соединения 1–6 связывают участки цепи внутри лампы накаливания, 7 — ввод с центральным контактом, 8 — предохранитель лампы накаливания с цоколем (резьбой), 9 — центральные контакты лампы и патрона, 10 — резьбу лампы и патрона.



Рис. 3. Эквивалентная схема экспериментальной установки для измерения токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот $2,5 \cdot 10^{-4} \div 0,5$ Гц методом компенсации постоянной составляющей тока

Вольтметр V, используемый для измерений напряжения, прикладываемого к металлическому образцу, подключался к схеме через соединения 11 и 12. Клеммы в патроне лампы обозначены соединениями 13 и 14, контакт «+» источника питания ИП1 — соединением 15. Проволочный резистор R_7 подключался к схеме через соединения 16 и 17. Для измерения флуктуаций тока использовался $4\frac{1}{2}$ -разрядный цифровой мультиметр, который подключался к схеме через соединения 18 и 19.

Серая область внутри пунктирной линии в нижней части рисунка соответствует участку электрической цепи внутри цифрового мультиметра. Резистором R_A обозначено внутреннее сопротивление мультиметра в режиме микроамперметра. Также на схеме показан усилитель напряжения, фильтр нижних частот и 16-битный аналогоцифровой преобразователь $\Lambda/\#$ с частотой дискретизации 1 Гц. Информация с цифрового выхода этого преобразователя в режиме реального времени передаётся на компьютер ПК через интерфейс RS-232 (И) с высоковольтной гальва-

нической развязкой. Фильтр нижних частот с частотой среза 0,5 Гц требуется для исключения искажений, связанных с элайзингом [18].

Стабилизированный регулируемый блок питания ИП1 с максимальным выходным напряжением 200 В используется для подачи напряжения на нить накала. Стабилизированный регулируемый по напряжению и току блок питания ИП2 служит для компенсации тока *I*_{HH}, проходящего через нить накала (см. следующий раздел).

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В силу небольшой величины относительных низкочастотных флуктуаций тока их прямая регистрация цифровыми методами затруднительна, т. к. необходимо определять изменения тока в 5÷6 знаках его значений. Технически указанное затруднение наиболее просто устранить путём

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин

центрирования исследуемого случайного процесса. Существует три наиболее очевидных способа центрирования случайных процессов: 1) использование аналоговых или цифровых фильтров верхних частот; 2) метод компенсации постоянной составляющей тока путём её вычитания; 3) мостовой метод компенсации постоянной составляющей. Использование фильтров верхних частот в данной работе оказалось затруднительным из-за очень низкого значения нижней граничной частоты (порядка 10⁻⁴ Гц). Поэтому применялись второй и третий методы измерений низкочастотных флуктуаций.

Для полной реализации возможностей цифровых технологий можно использовать метод компенсации постоянной составляющей тока $I_{\rm HH}$, проходящего через нить накала, с помощью дополнительного источника постоянного напряжения ИП2 и резистора R_7 (см. рис. 3). Перед началом измерений напряжение $U_{\rm MI2}$ источника питания ИП2 устанавливалось таким, чтобы ток

$$I_{\mu A} = I_{HH} - I_{KOMII},\tag{7}$$

где $I_{\text{комп}}$ — ток, проходящий через резистор R_7 , не превышал минимального доступного предела измерений цифрового мультиметра (в режиме микроамперметра). Для уменьшения влияния температурных дрейфов напряжений и токов перед запуском передачи данных на ПК проводился длительный (не менее 30 мин) прогрев установки и объекта исследований в заданном режиме работы. Измеренные значения $I_{\mu A}$ передавались на ПК с тактовой частотой 1 Гц с последующей записью в текстовый файл.

При использовании метода компенсации постоянной составляющей тока на результат измерений влияют флуктуации выходного напряжения и тока обоих источников питания. В связи с этим в данной работе дополнительно используется специальная мостовая схема, компенсирующая собственные шумы источников питания, и специально разработанная нами схема измерений. Аналоговая часть измерительной схемы и методика проведения таких измерений в данной работе не рассматриваются. При использовании мостовой схемы измерений её цифровая часть полностью идентична показанной на рис. 3.

В зависимости от точности балансировки плеч моста применение мостовой схемы позволило улучшить отношения сигнал/помеха (сигнал/шум) измерительной схемы в $10^2 - 10^3$ раз. Сигналом здесь являются НЧ флуктуации нитей накала, а помехой — флуктуации источников питания. Для результатов, полученных с применением мостовой схемы и приведённых на рис. 4 и 5, отношение сигнал/шум составляло не менее 500 (54 дБ). Достигнутый показатель отношения сигнал/шум позволил полностью исключить влияние флуктуаций источников питания на результаты измерений, полученные с применением мостовой схемы. Для сравнения укажем, что применение традиционной схемы измерений, приведённой на рис. 3, обеспечивало отношение сигнал/шум вблизи значений, равных 1. При таких показателях получаемые результаты измерений (см. рис. 6) нельзя идентифицировать с флуктуациями в нитях накала.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ТОКА В НИТЯХ НАКАЛА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 1 260÷2 600 К

Относительно высокие температуры (1260÷2600 К), при которых проводятся исследования низкочастотных флуктуаций, приводят к одновременному проявлению различных по физической природе процессов в лампе накаливания, в частности:

1) активированных высокими температурами интенсивных адсорбционно-десорбционных процессов на поверхности нити накала;

2) активированных высокими температурами интенсивных конвекционных процессов инертного газа внутри колбы лампы накаливания;



Рис. 4. Центрированные реализации флуктуаций $\Delta I \equiv I_{\Delta HH}(t) - \langle I_{\Delta HH} \rangle$ тока во времени t в нити накала ($I_{\Delta HH}$ — измеренный ток, угловые скобки означают усреднение), измеренные мостовым методом компенсации собственных шумов источника питания, при четырёх значениях напряжения: 50 В (*a*), 100 В (*b*), 150 В (*b*) и 200 В (*c*, *d*)

3) относительно медленного прогрева различных элементов лампы накаливания (держателей нити накала, токоподводящих проводов, инертного газа, колбы, цоколя и тому подобного);

4) относительно высокого уровня деградации нити накала в течение измерения одной полной реализации с длительностью 3÷5 ч (следует отметить, что при номинальном напряжении питания 230 В средний срок службы лампы около 1000 ч, так что за время измерения одной реализации расходуется примерно 1/250 технического ресурса нити накала);

5) интенсивного испарения атомов металла с поверхности с их последующим частичным возвратом на нить накала с достаточно сложной цепочкой происходящих физико-химических про-

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин



Рис. 5. Графики СПМ без применения (*a*) и с применением (*б*) рекурсивного фильтра. Использовано усреднение по пяти реализациям флуктуаций тока в нити накала, измеренным мостовым методом компенсации собственных шумов источника питания, при четырёх значениях напряжения: 50 В (линия 1), 100 В (2), 150 В (3) и 200 В (4)

цессов (обычный цикл регенерации в инертных газах или галогенный цикл регенерации в зависимости от конструкции лампы);

6) влияния потока электромагнитного излучения (инфракрасного, видимого светового, ультрафиолетового);

7) влияния процессов теплопроводности окружающей среды (инертного газа), держателей и токопроводящих проводов;

8) влияния гравитационного поля Земли (провисание нити накала под действием силы тяжести, направление движения конвекционных потоков инертного газа: тёплый поток идёт вверх, против направления силы тяжести, а холодный поток — вниз, по направлению силы тяжести);

9) особенностей отвода тепла от работающей лампы накаливания (свободная среда, наличие плафона или отражателей светового потока, ориентация лампы).

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин

257



Рис. 6. Центрированная реализация (*a*), СПМ до (*б*) и после (*в*) применения сглаживающего рекурсивного фильтра нижних частот для флуктуаций тока в нити накала, измеренных методом компенсации постоянной составляющей тока

Кроме перечисленных выше основных факторов, влияющих на низкочастотные флуктуации тока нити накала, можно указать и на ряд дополнительных (неосновных) факторов:

а) флуктуации конвекционных потоков воздуха около колбы лампы накаливания;

б) влияние потоков электромагнитных излучений (радиочастотных, инфракрасных, световых, ультрафиолетовых, ионизирующих);

в) флуктуации температуры воздуха вблизи колбы лампы накаливания.

Столь обширное количество влияющих факторов, перечисленных выше в пунктах 1)–9) и а)– в), не могло не отразиться на особенностях низкочастотных токовых флуктуаций. На рис. 7 приведены две типичные центрированные реализации низкочастотных флуктуаций тока через нить

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин



Рис. 7. Центрированные реализации флуктуаций тока в нитях накала ламп с мощностью 25 Вт, измеренные мостовым методом с компенсацией собственных шумов источника питания

накала, измеренные методом компенсации собственных шумов источника питания. Реализация на рис. 7*a* измерена при температуре около 2300 К в течение примерно 4 ч 37 мин. Реализация на рис. 7*б* измерена при температуре около 2600 К в течение примерно 4 ч 43 мин.

На реализациях, приведённых на рис. 4 и 7, достаточно легко можно выделить следующие характерные виды изменения тока от времени:

1) релаксационные, или экспоненциальные, случайные процессы, которые можно предположительно связать как с электронными процессами [12], так и с деградацией (испарением атомов) нити накала;

2) импульсные случайные процессы, которые предположительно могут быть обусловлены миграцией [19, 20] кластеров (групп атомов, связанных между собой) с возвращением их в начальное положение;

3) ступенчатые случайные процессы, вызванные, например, миграцией кластеров без возвращения их в начальное положение;

4) квазинепрерывные случайные процессы, которые предположительно могут быть вызваны как электронными [10–12], так электромиграционными [6] процессами в нити накала.

Все указанные виды случайных процессов были непредсказуемы по времени их появления, длительности протекания и интенсивности.

В данной работе мы не приводим подробный детальный анализ спектральных характеристик отдельных участков и видов флуктуаций, т. к. это может составить содержание нескольких публикаций. Мы будем придерживаться обзорного характера исследований спектральных характеристик НЧ флуктуаций в реализациях, содержащих все или почти все их элементарные виды.

Для расчёта СПМ флуктуаций тока и напряжения в данной работе использовалась программа

260

«Расчёт СПМ» собственной разработки [21]. В программе к центрированным процессам применялось быстрое преобразование Фурье по 8192 или 16384 точкам.

Для удобства визуального анализа и сравнения графики СПМ сглаживались с помощью рекурсивных цифровых фильтров нижних частот первого порядка. Рассмотрим алгоритмы реализации таких фильтров. Пусть *x* — исходный сигнал, *y* — сигнал после фильтрации. Для устранения нежелательных сдвигов по частоте использовалась парная фильтрация «вперёд» и «назад». Фильтрацию «вперёд» можно описать разностным уравнением

$$y_n = \left[1 - \frac{1}{L_{\rm F}(n)}\right] y_{n-1} + \frac{x_n}{L_{\rm F}(n)},\tag{8}$$

в которое значения x_n и y_n подставляются в порядке возрастания порядкового номера n частотных составляющих СПМ. Фильтрацию «назад» можно описать разностным уравнением

$$y_n = \left[1 - \frac{1}{L_{\rm F}(n)}\right] y_{n+1} + \frac{x_n}{L_{\rm F}(n)},$$
(9)

в которое значения x_n и y_n подставляются в порядке убывания индекса n. Параметр $L_F(n)$ в уравнениях (8) и (9) зависит от n согласно формуле

$$L_{\rm F}(n) = \begin{cases} 1, & 0 \le n < N_1; \\ L_{\rm F_{min}} q^{n-N_1}, & N_1 \le n \le N_1 + \log_q \frac{L_{\rm F_{max}}}{L_{\rm F_{min}}}; \\ L_{\rm F_{max}}, & n > N_1 + \log_q \frac{L_{\rm F_{max}}}{L_{\rm F_{min}}}, \end{cases}$$
(10)

где N_1 — количество точек, к которым не применяется фильтр, $L_{\rm F_{min}} = L_{\rm F}(N_1)$, $L_{\rm F_{max}}$ — максимальное допустимое значение $L_{\rm F}$, q — знаменатель геометрической прогрессии, q > 1. Выбор зависимости (10) для $L_{\rm F}(n)$ обусловлен увеличением разброса значений на графиках СПМ с ростом частоты.

Для фильтрации частотных зависимостей СПМ использовалась программа «Расчёт СПМ» [21]. К результату фильтрации «вперёд» с параметрами $N_1 = 1$; $L_{\rm F_{min}} = 1,4$; $L_{\rm F_{max}} = 2,5$; q = 1,005 применялась фильтрация «назад» с такими же параметрами.

На рис. 6*a* показана центрированная реализация низкочастотных флуктуаций тока через нить накала 25-ваттной лампы. Измерения проведены при среднеобъёмной температуре нити накала около 2500 К в течение примерно 2 ч 35 мин с помощью метода компенсации постоянной составляющей. Величина относительных флуктуаций не превышает $2,4 \cdot 10^{-4}$. На рис. 6*b* показана частотная зависимость СПМ, рассчитанная по первым 8192 точкам данной реализации, а на рис. 6*b* — та же СПМ, сглаженная с помощью программы «Расчёт СПМ» [21].

Из приведённых графиков видно, что в двойном логарифмическом масштабе частотная зависимость СПМ имеет различный наклон (и индекс СПМ) на различных участках частотного диапазона. На частотах меньше 10^{-3} Гц усреднённый индекс СПМ составляет $\gamma = 3.5$, на частотах $10^{-3} \div 10^{-1}$ Гц этот индекс равен примерно 1.4 ± 0.2 , а на частотах $10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-1}$ Гц усреднённый индекс составляет примерно 1.9 ± 0.2 . К сожалению, при использовании метода компенсации постоянной составляющей тока измеренные НЧ флуктуации некорректно ассоциировать только с нитями накала, т. к. сказывается влияние флуктуации напряжения и тока источников питания. Поэтому при проведении основных измерений применялся мостовой метод компенсации собственных шумов в источнике питания.

$U_{\rm M\Pi},{ m B}$	$\langle I \rangle$, A	$U_{\rm HH},{\rm B}$	T, K	$\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle} / \langle I \rangle$
50	$0,\!0535$	48,9	1263	$(7,2\pm4,5)\cdot10^{-5}$
100	0,0725	$98,\! 6$	1834	$(6,7\pm4,1)\cdot10^{-5}$
150	$0,\!0875$	148,3	2265	$(2,2\pm 1,2)\cdot 10^{-4}$
200	0,1015	198,0	2594	$(3,3\pm1,9)\cdot10^{-4}$

Таблица 1. Температура нитей накала, средний ток и напряжение накала, относительные флуктуации тока при различных напряжениях источника питания

Таблица 2. Индексы СПМ γ , усреднённые по пяти измерениям, и их неопределённости типа А в различных диапазонах частот

Диапазон частот, Гц	Напряжение нити накала				
	$50 \mathrm{B}$	100 B	$150 \mathrm{B}$	200 B	
$2 \cdot 10^{-4} \le f \le 10^{-3}$	$1{,}83 \pm 1{,}16$	$1{,}56\pm0{,}81$	$1{,}94 \pm 1{,}54$	$2{,}55\pm0{,}83$	
$10^{-3} \le f \le 10^{-2}$	$1,\!47\pm0,\!21$	$1,\!35\pm0,\!44$	$1{,}86 \pm 0{,}27$	$1{,}71\pm0{,}25$	
$10^{-2} \le f \le 10^{-1}$	$2{,}16\pm0{,}08$	$1,\!87\pm0,\!27$	$1{,}76\pm0{,}29$	$1{,}54\pm0{,}16$	
$10^{-1} \le f \le 0,5$	$1{,}01\pm0{,}15$	$1{,}28\pm0{,}28$	$1{,}18\pm0{,}21$	$1{,}20\pm0{,}26$	
$2\cdot 10^{-4} \le f \le 0.5$	$1,\!83\pm0,\!12$	$1{,}61\pm0{,}23$	$1{,}78\pm0{,}09$	$1{,}64\pm0{,}13$	

Для каждого из четырёх значений напряжения $U_{\rm HI}$ источника питания (50, 100, 150 и 200 В) были измерены по пять реализаций флуктуаций (на рис. 4 приведены некоторые из центрированных реализаций), по которым были рассчитаны усреднённые для каждого напряжения СПМ. Полученные спектры сглаживались с помощью программы «Расчёт СПМ» [21]. Использовались те же настройки фильтрации, что и для рис. 6*6*. Усреднённые по пяти реализациям исходные спектры показаны на рис. 5*a*, усреднённые спектры — на рис. 5*б*.

Сравнение изображённых на рисунке реализаций показывает, что при относительно небольших напряжениях, 50 и 100 В, реализации флуктуаций содержат в себе квазинепрерывные процессы (рис. 4a и δ). При более высоких напряжениях, 150 и 200 В, в реализациях случайным образом появляются импульсные процессы (рис. 46 и s) и релаксационные процессы (рис. 4d).

Для каждого из четырёх значений напряжения $U_{\rm HI}$ источника питания в табл. 1 приведены средние значения тока $\langle I \rangle$ и напряжения $U_{\rm HH}$ на концах нити накала, температура нити T и величина относительных флуктуаций тока $\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle} / \langle I \rangle$ усреднённая по пяти реализациям. Для относительных флуктуаций указаны также неопределённости типа A (случайные погрешности) [22, 23]. Для нахождения дисперсий $\langle (I - \langle I \rangle^2 \rangle$ использовались отсчётные значения реализаций флуктуаций. Среднеобъёмная температура нити накала рассчитывалась методом термосопротивления [15]. Относительная ошибка измерения температуры данным методом составляет около 2% [15].

В табл. 2 приведены усреднённые по пяти различным реализациям значения индекса СПМ γ при четырёх различных напряжениях источника питания $U_{\rm И\Pi}$ и в различных диапазонах частот. Неопределённости типа А (случайные погрешности), указанные в табл. 2, примерно на порядок превышали инструментальные погрешности [24] измерения γ . Изменение значений γ в различных диапазонах частот и, в частности, уменьшение γ в диапазоне частот выше 10^{-1} Гц пока преждевременно однозначно сопоставлять с проявлением тех или иных видов флуктуационных процессов.



Рис. 8. Зависимость СПМ НЧ флуктуаций от температуры нити накала (a) и тока накала (б) при различных значениях частоты $f: f = 1 \cdot 10^{-3}$ Гц (кривые 1); $f = 3,16 \cdot 10^{-3}$ Гц (кривые 2) и $f = 1 \cdot 10^{-2}$ Гц (кривые 3)

Для исследования влияния тока накала и температуры нити накала на СПМ для всех четырёх напряжений $U_{\rm И\Pi}$ были рассчитаны средние арифметические значения СПМ при трёх различных значениях частот и оценены неопределённости типа А. Для повышения точности нахождении значения СПМ для каждой реализации использовалась степенная аппроксимация сглаженной СПМ по двум ближайшим к нужной частоте точкам. На рис. 8*a* показаны полученные зависимости величины СПМ от температуры, а на рис. 8*b* — зависимости СПМ от тока накала. Использовались значения тока накала и температуры из табл. 1. Значения СПМ рассчитывались по 8 192 точкам с помощью быстрого преобразования Фурье. Все неопределённости типа А рассчитывались при доверительной вероятности 95% с использованием распределения Стьюдента.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В соответствии с полученными экспериментальными частотными, токовыми и температурными зависимостям СПМ флуктуаций дрейфового тока через нить накала весь диапазон исследуемых частот можно разделить на 4 части.

1) Диапазон частот ниже 10^{-3} Гц. В данной области индекс СПМ γ возрастает от $1,6 \pm 0,8$ до $2,6 \pm 0,8$. Относительно больши́е величины абсолютных неопределённостей типа A (случайных погрешностей), примерно на порядок превышающих методические погрешности, свидетельствуют о проявлении нестационарностей флуктуационных процессов. Возрастание индекса СПМ γ с увеличением напряжения питания логично связать с заметным проявлением деградационных процессов при повышенных напряжениях. Относительная неопределённость типа A измерения γ в данном диапазоне частот — от 32 до 80%.

2) В диапазоне частот $10^{-3} \div 10^{-2}$ Гц частотная зависимость СПМ НЧ флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала хорошо аппроксимируется функцией вида $1/f^{\gamma}$ с индексом СПМ γ , изменяющимся с изменением напряжения питания в пределах от $1,4 \pm 0,4$ до $1,9 \pm 0,3$. Относительная неопределённость типа A измерения γ в данном диапазоне частот — от 15 до 33%.

3) В диапазоне частот $10^{-2} \div 10^{-1}$ Гц частотная зависимость СПМ НЧ флуктуаций тока нити накала также хорошо аппроксимируется функцией вида $1/f^{\gamma}$ с индексом СПМ γ , убывающим с повышением напряжения питания в пределах от $2,2 \pm 0,1$ до $1,5 \pm 0,2$. Относительная неопределённость типа А измерения γ в данном диапазоне частот — от 4 до 14%.

4) В диапазоне частот больше 10^{-1} Гц при высоких температурах, наряду с шумом вида $1/f^{\gamma}$, проявляются частотно-независимые компоненты шума, которые предположительно могут являться тепловыми и дробовыми шумами дрейфового тока и энергетических потоков теплового излучения. Индекс СПМ γ незначительно меняется с изменением напряжения питания, в преде-

Ю. А. Захаров, С. С. Гоц, Р. З. Бахтизин

лах от $1,0 \pm 0,2$ до $1,3 \pm 0,3$, т. е. в пределах случайных неопределённостей остаётся практически постоянным. Относительная неопределённость типа А измерения γ в данном диапазоне частот — от 15 до 22%.

Во всём диапазоне исследованных частот, $2 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-1}$ Гц, частотная зависимость СПМ НЧ флуктуаций тока нити накала также хорошо аппроксимируется выражением вида $1/f^{\gamma}$ с практически постоянным индексом СПМ γ , изменяющимся в диапазоне значений $(1,6\div 1,8)\pm 0,2$ во всём диапазоне изменения напряжения питания. Относительная неопределённость типа А измерения γ в данном диапазоне частот — от 5 до 14%.

В заключение отметим, что согласно литературным источникам исследованные в работе НЧ флуктуации тока в вольфрамовых нитях накала могут вызываться следующими процессами:

1) Рассеяние электронов на фононах и дефектах кристаллической решётки, приводящее к флуктуациям подвижности электронов [6] и равновесному фликкер-шуму (5).

2) Длинновременна́я корреляция электронов проводимости. В приближении пуассоновской статистики НЧ флуктуаций полученная в данной работе численная оценка величины относительных НЧ флуктуаций позволяет сделать вывод о том, что в формировании $1/f^{\gamma}$ -шума может участвовать не менее $(3,3\cdot10^{-4})^{-2} \approx 10^7$ электронов проводимости. Относительно высокая вероятность рассеяния электронов проводимости на фононах способствует экспоненциально быстрому снижению вероятностей [1] длинновременны́х корреляций электронов проводимости между собой и обусловливает крайне незначительный уровень НЧ флуктуаций, который в макроскопических металлических образцах долго не удавалось обнаружить экспериментально.

3) Стимулированная электрическим полем миграцияй групп атомов [6, 19], приводящая к неравновесному $1/f^{\gamma}$ -шуму (6) с параметрами $\gamma = 2$ и $3 \leq \lambda \leq 7$.

4) Генерация избыточных вакансий [6], приводящей к равновесному (5) и неравновесному (6) фликкер-шуму с параметрами $\gamma = 1$ и $\lambda = 4$ в (6).

5) Локальный перегрев, вызванный неоднородностью проводника и приводящий к генерации подвижных дефектов решётки и неравновесному $1/f^{\gamma}$ -шуму (6) с параметрами $\gamma = 1$ и $\lambda = 4$ [6].

6) Деградационный процесс в нитях накала [17], приводящий к усилению НЧ флуктуаций и к их нестационарности в области высоких температур.

7) Нагрев других элементов электрической цепи [15] и окружающей среды, приводящий к нестационарности фликкер-шума. На полученных реализациях наблюдается в виде длительных по времени релаксационных случайных процессов (рис. 4*д*).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В реализациях низкочастотных токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала можно выделить 4 основных вида случайных процессов: релаксационный (экспоненциальный), импульсный, ступенчатый, квазинепрерывный.

2) В вольфрамовых нитях накала низкочастотные токовые флуктуации в диапазоне частот $2.5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-1}$ Гц имеют частотную зависимость вида $1/f^{\gamma}$ с усреднённым индексом спектральной плотности мощности γ , меняющимся в пределах $(1.6 \div 1.8) \pm 0.2$.

3) Увеличение тока, проходящего через нить накала, и соответствующий рост её температуры приводит к усилению нестационарности $1/f^{\gamma}$ -шума.

4) Величина относительных низкочастотных флуктуаций тока в диапазоне температур 1200 \div 2600 К не превышает $3 \cdot 10^{-4}$ и имеет тенденцию к увеличению с ростом температуры нити накала.

5) Найденные особенности низкочастотных флуктуаций тока в вольфрамовых нитях накала авторы связывают с процессами электрон-фононного рассеяния, с длинновременными корреля-

циями электронов проводимости, с миграцией и испарением атомов металла, с сорбционными процессами, происходящими с атомами инертного газа, с деградационными процессами в нитях накала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гоц С.С. Основы описания и компьютерных расчётов характеристик случайных процессов в статистической радиофизике: Учебное пособие. Уфа : РИО БашГУ, 2005. 168 с.
- 2. Johnson J. B. // Phys. Rev. 1925. V. 26, No. 1. P. 71–85. https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.71
- 3. Schottky W. // Phys. Rev. 1926. V. 28, No. 1. P. 74–103. https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.74
- 4. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение) / пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. М. : Сов. радио, 1973. 228 с.
- 5. Якимов А.В. Введение в физику шумов: Учебное пособие. Нижний Новгород : ННГУ, 2016. 107 с.
- 6. Жигальский Г.П. // Успехи физ. наук. 2003. Т.173, № 5. С.465–490. https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200305a.0465
- 7. Hooge F. N. // Phys. Lett. A. 1969. V. 29, No. 3. P. 139–140. https://doi.org/10.1016/0375-9601(69)90076-0
- Orlov V.B., Yakimov A.V. // Physica B: Condensed Matter. 1990. V.162, No. 1. P.13–20. https://doi.org/10.1016/0921-4526(90)90087-B
- 9. Клюев А.В., Шмелёв Е.И., Якимов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т.57, № 12. С. 995–1004.
- Гоц С. С., Захаров Ю. А., Бахтизин Р. З. // Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники: сб. тез. докл. IV Всеросс. научной молодёжной конф. 29 ноября—02 декабря 2016 г., Уфа. С. 52–53.
- 11. Галлямов Р.Р., Гоц С.С., Бахтизин Р.З. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 359–366.
- 12. Ghots S.S., Bakhtizin R.Z. // Appl. Surface Sci. 2003. V.215, No. 1–4. P.105-112. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00314-3
- 13. Ашкрофт Н., Мермин Н. // Физика твердого тела. Т. 1 / пер. с англ. М. : Мир, 1979. 420 с.
- 14. Yakimov A.V., Hooge F.N. // Physica B: Condensed Matter. 2000. V. 291, No. 1–2. P. 97–104. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01390-3
- 15. Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З. // Измерительная техника. 2019. №. 4. С. 51–56. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-4-51-56
- Беляков А. В., Клюев А. В., Якимов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 2. С. 149– 161.
- 17. Афанасьева Е.И., Скобелев В.М. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. М. : Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
- 18. Гоц С.С. Основы построения и программирования автоматизированных систем цифровой обработки сигналов: Учебное пособие. Уфа : РИЦ БашГУ, 2009. 222 с.
- 19. Neri B., Ciofi C., Dattilo V. // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. V. 44, No. 9. P. 1454–1459. https://doi.org/10.1109/16.622601
- 20. Yakimov A., Forrest S.R. // Appl. Phys. Lett. 2002. V.80, No. 9. P.1667–1669. https://doi.org/10.1063/1.1457531
- 21. Свид-во РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019667792. Расчёт СПМ (с фильтрацией спектральной плотности мощности) : № 2019666742 : пост. 16.12.2019 ; рег. 27.12.2019 / Захаров Ю. А., Гоц С. С.

- 22. Стулова А. Д. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. М. : Стандартинформ, 2012. 107 с.
- 23. Афанасенко Л. В. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2013. 23 с.
- 24. Младенцев А. Л., Якимов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36, № 6. С. 559–564.

Поступила в редакцию 5 ноября 2019 г.; принята в печать 31 марта 2020 г.

STUDY OF THE SPECTRUM OF LOW-FREQUENCY CURRENT FLUCTUATIONS IN FILAMENTS OF ELECTRIC LAMPS

Yu. A. Zakharov, S. S. Ghots, and R. Z. Bakhtizin

We study experimentally the spectral characteristics of low-frequency current fluctuations in tungsten filaments of lighting lamps in the ranges of frequencies $2.5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-1}$ Hz and temperatures 1260–2600 K. To decrease the influence of the edge effects and increase the measurement accuracy, subtraction (compensation) of the constant component of the current. Application of special schemes allowed decreasing significantly the influence of the inherent noise of power supplies which are used to feed the lamp filaments. It is found that low-frequency current fluctuations are a randomly timeinterleaved aggregate of four random processes: relaxation, pulsed, stepwise, and quasi-continuous ones. We show that relative fluctuations do not exceed $3 \cdot 10^{-4}$ in the entire range of the studied frequencies, and the frequency dependence of the spectral power density is well approximated by a function having the form $1/f^{\gamma}$ and the index γ of the spectral power density within the $(1.6-1.8) \pm 0.2$ limits. The dependence of the parameters of the spectral power density of low-frequency current fluctuations on the average value of the current and the volume-average temperature is studied. In our opinion, the revealed features of low-frequency fluctuations are related to the electron, atomic, and degradation processes in lamp filaments.