

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

*Кафедра компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала  
Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН*

**МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОГО ЭМИТТЕРА  
ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРА ИНТЕНСИВНОСТИ  
ЭМИССИИ ПО ЗАКОНУ РЕЛЕЯ**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ  
(МАГИСТЕРСКОЙ) РАБОТЫ  
студентки 2 курса 251 группы  
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета  
Мироненко Ксении Витальевны

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. профессор А. С. Шаповалов

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н. профессор В.М. Аникин

Саратов  
2018

## ВВЕДЕНИЕ.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [1-10] шумовые свойства катодов вакуумных электронных приборов существенным образом зависят от степени неоднородности эмиттеров: геометрической (шероховатость эмитирующей поверхности), эмиссионной (зависимость эмиссионной способности от координат или параметров состояния катода), кинетической (зависимость плотности распределения скорости эмиттированных электронов от координат эмитирующего центра) и т.д.

Одним из важных типов неоднородности катода является неоднородность эмиссионного состояния. Она заключается в том, что катод может иметь не одно, а множество эмиссионных состояний, каждому из которых соответствует своё значение параметра интенсивности эмиссии. Под этим параметром будем понимать условное среднее число электронов, эмиттированных в единицу времени при условии, что катод находится в соответствующем эмиссионном состоянии. Таким образом, это параметр, характеризующий определенный тип возможного эмиссионного состояния.

Величина параметра интенсивности эмиссии определяется множеством физических процессов: отравления эмиттированных центров, оседание атомов остаточных газов на поверхность катода и т.д.. В условиях непрерывного протекания этих процессов значения параметра интенсивности нельзя предсказать, а это означает, что для реального эмиттера параметр интенсивности представляет собой случайную величину. В работах [5-8] показано, что непрерывная смена эмиссионных катодных состояний за счёт указанных выше процессов приводит к возникновению дополнительной компоненты дробового шума, которая была названа аномальным дробовым шумом. Вследствие появления этой компоненты полный уровень дробового шума может значительно превышать уровень, предсказываемый формулой Шоттки.

Аномальная компонента дробового шума имеет много общего с фликкер-шумом. Исследования частотной зависимости спектральной плотности аномальной компоненты показали [5,7], что она подобна аналогичной кривой для

фликкер-шума, то есть снижение спектральной плотности, по мере уменьшения частоты, пропорционально величине  $1/f^\alpha$ , где  $\alpha = \text{const}$  [11-14]. Это означает, что физический механизм генерации фликкер-шума возможно включает в себя и те физические процессы, которые вызывают аномальный дробовой шум. Вместе с тем аномальный дробовой шум имеет и принципиальные отличия от фликкер-шума. Ширина спектра фликкер-шума невелика и, обычно, не превышает нескольких десятков килогерц. При дальнейшем увеличении частоты фликкер-шум по уровню значительно ниже дробового, то есть маскируется дробовым шумом. Касательно аномальной компоненты дробового шума, ширина ее спектра значительно выше и по порядку величины равна  $I_0/e$  ( $I_0$  – постоянная составляющая тока,  $e$  – заряд электрона). В указанный диапазон частот попадают практически все частоты, используемые в радиофизике и электронике (исключения составляют слаботочные приборы) [5,6].

Для уточнения физической природы и механизма дополнительных источников шума, в том числе аномального дробового шума, фликкер-шума, а также для объяснения экспериментальных результатов исследования шумовых свойств приборов, разработки методов снижения собственных шумов устройств представляется актуальным статистическое моделирование неоднородности эмиссионных состояний и расчет уровня аномальных дробовых шумов на его основе. Естественно, большой практический интерес представляет теоретическое исследование и объяснение природы и уровня аномального дробового шума на низких частотах, то есть в той области частот, где его свойства подобны свойствам фликкер-шума, природа которого до сих пор не разгадана.

В связи с этим, перед данной выпускной квалификационной работой была поставлена задача по расчету уровня аномального дробового шума в низко частотных областях его спектра для многоуровневой статистической модели неоднородного эмиттера, которой отвечает распределение параметра интенсивности эмиссии, подчиненное закону Релея.

## МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕРЕГУЛЯРНОГО ЭМИТТЕРА ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ ПО ЗАКОНУ РЕЛЕЯ

В этом параграфе рассмотрим модели, так же, имеющую  $N$  эмиссионных состояний, а вероятность эмиссионных состояний описывается законом Релея. Введем в рассмотрение интервал возможных значений параметра  $\lambda$ , параметр  $q$ , который определяется шириной интервала  $\Delta\lambda$  и средним значением  $\lambda_0$ .

Распределение вероятностей в таком случае запишется следующим образом:

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} e^{-\lambda_i^2 / 2\lambda_0^2}$$

Для описания модели воспользуемся гиперэкспоненциальным законом распределения интервала времени  $\tau$ , который описывается выражением (4.1).

$$\varphi(\tau) = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i^2}{\lambda_0} e^{-\lambda_i \tau} e^{-\lambda_i^2 / 2\lambda_0^2} \quad 4.1$$

Исходя из (3.1) получено выражение для коэффициента повышения шума:

$$\gamma(\Omega) = 1 + 2 \frac{AC - B^2}{\Omega^2 C^2 + B^2},$$

где

$$A(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(\lambda_i / \lambda_0)^3 e^{-\lambda_i^2 / 2\lambda_0^2}}{(\lambda_i / \lambda_0)^2 + \Omega^2},$$

$$B(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(\lambda_i / \lambda_0)^2 e^{-\lambda_i^2 / 2\lambda_0^2}}{(\lambda_i / \lambda_0)^2 + \Omega^2},$$

$$C(\Omega) = \sum_{i=1}^N \frac{(\lambda_i/\lambda_0) e^{-\lambda_i^2/2\lambda_0^2}}{(\lambda_i/\lambda_0)^2 + \Omega^2}.$$

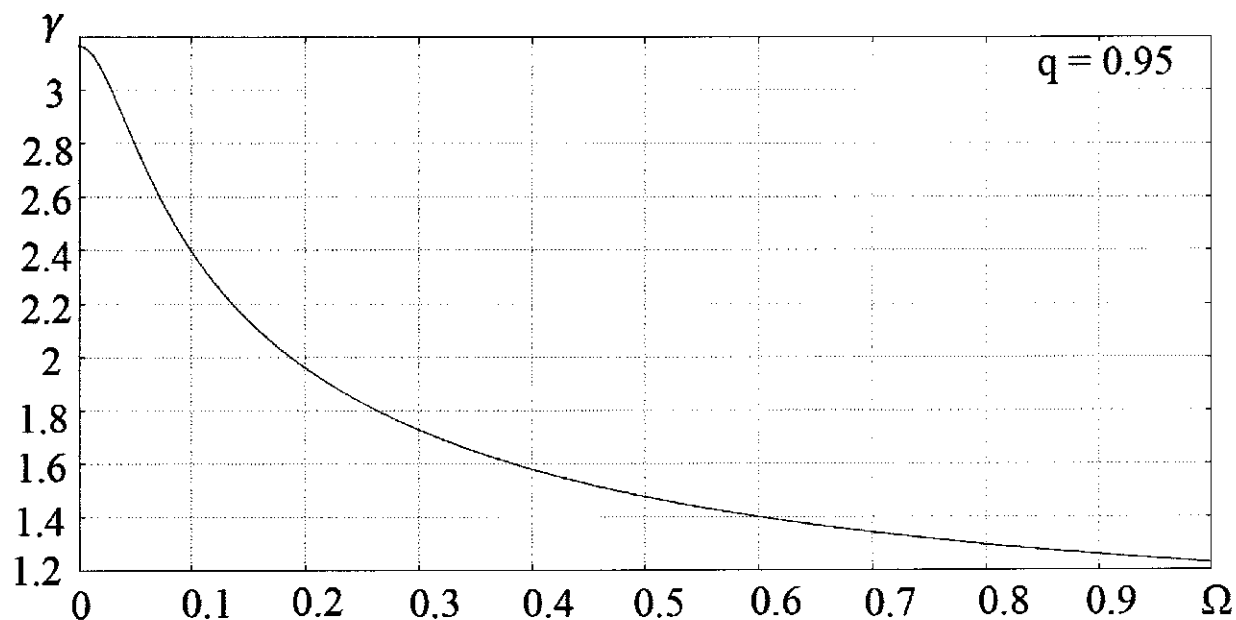


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента повышения шума  $\gamma$  от приведенной частоты  $\Omega$

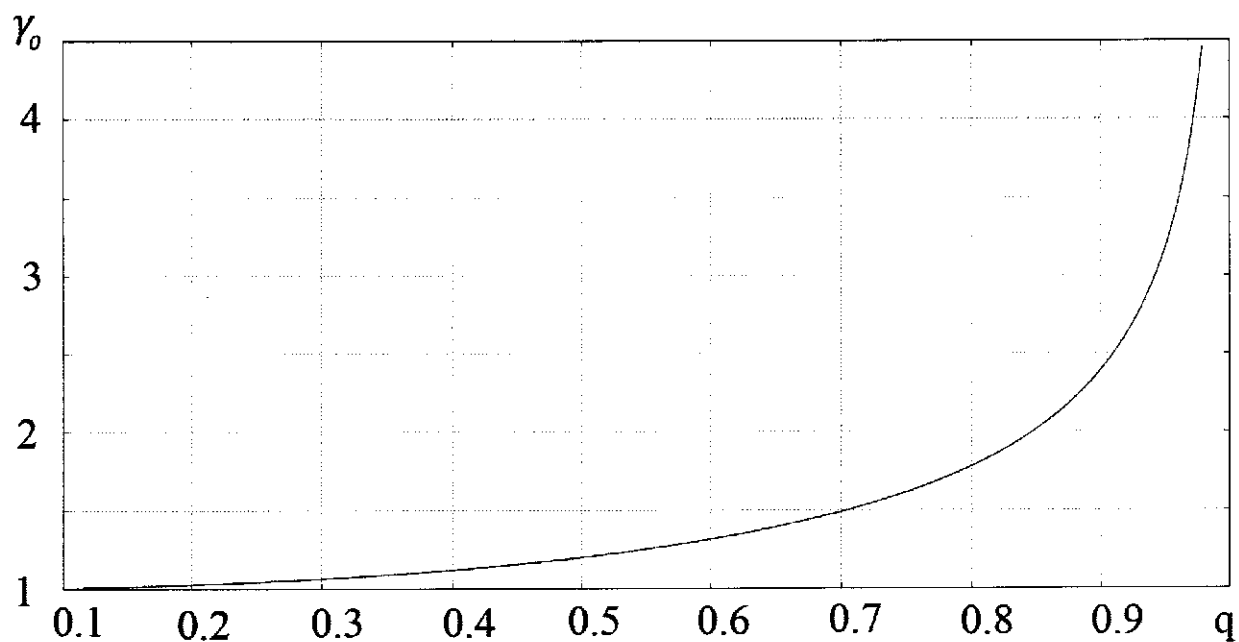


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента повышения шума  $\gamma$  при частоте стремящейся к нулю от относительной полуширины спектра  $q$

Из рисунка 15 видно, что даже при достаточно большом значении параметра  $q$  квадрат коэффициента вариации (коэффициент повышения шума при частоте стремящейся к нулю) имеет небольшое значение, а следовательно и большую частоту среза. Рисунок 16 подтверждает ранее полученные результаты о том, что уменьшение интервала возможных значений  $\lambda$  приводит к значительному уменьшению коэффициента повышения шума, вплоть до единицы. Ширина спектра (частота среза) при  $q=0.95$  примерно равна 0.15, что говорит о том, что аномальная компонента шума будет заметна в большой полосе частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенного исследования была выполнена следующая работа, позволившая существенно дополнить физические представления о природе аномального дробового шума, статистическом механизме его возникновения, возможных числовых характеристиках его уровня.

Для возможности сравнения параметров аномального дробового шума с аналогичными величинами других источников флуктуаций проведен краткий обзор известных механизмов генерации шумов в электронных приборах. К ним относятся дробовой шум, тепловой шум, генерационно-рекомбинационный шум, фликкер-шум.

Основные результаты, обладающие новизной, получены на многоуровневой модели неоднородного эмиттера при распределении параметра интенсивности эмиссии, подчиняющемуся закону Релея. Варьирование параметров модели позволяет подтвердить ранее полученные результаты и оценить применимость модели в конструировании приборов, содержащих эмиттер. Достоинством модели является относительно низкий коэффициент повышения шума при достаточно больших значениях относительной полуширины спектра  $q$ .

### Список использованных источников

1. Ахманов С.А. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах/ С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. М.: Физматлит, 2010.
2. Шаповалов А.С. Вероятностные расчёты в физике/ А.С. Шаповалов. С.: Саратов. 2015.
3. Якубов В.П. Статистическая радиофизика/ В.П. Якубов. Изд-во ТГУ. 2003.
4. Букингем, М. Шумы в электронных приборах и системах/ М. Букингем. М.: Мир, 1986. 398с.
5. Шаповалов, А.С. Эмиссионные и шумовые свойства неоднородных эмиттеров/ А.С. Шаповалов, А.Ф. Голубенцев, Ю.И. Денисов. С.: Издательство Саратовского университета, 1983. 90с.
6. Шаповалов А.С. Статистический механизм возникновения аномальных дробовых шумов в потоках носителей заряда/ А.С. Шаповалов, Ю.И. Денисов. Изв. Вузов. Радиолекtronика. Т.28, №5, 1985. с.88.
7. Инкин М.Г., Мироненко К.В., Минкин Л.М., Шаповалов А.С. Частотные характеристики аномального дробового шума для трехуровневой симметричной модели неоднородного эмиттера/Вопросы прикладной физики выпуск №22 С.: Изд. Саратовского университета, 2015. с.48-51
8. Мироненко К.В., Инкин М.Г., Минкин Л.М., Шаповалов А.С. Энергетические характеристики аномального дробового шума для трехуровневой симметричной модели неоднородного эмиттера/Вопросы прикладной физики выпуск №22 С.: Изд. Саратовского университета, 2015. с.52-53
9. Набоков Ю.И. Об аномальном дробовом эффекте в приборах с оксидным катодом/ Ю.И. Набоков, В.Е. Авдеев. Известия АН СССР Сер. Физическая. Т.33, №3, 1960. с.452-457.



10. Попов А.И. О возможном механизме аномально высоких дробовых шумов в ПУЛ/ А.И. Попов, Д.Е. Колпаков. Электронная техника. Сер. 5. Приемно-усилительные лампы, В.1, 1971. с.35-42.
11. Малахов, А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах/  
А.Н. Малахов. М.: Наука, 1968. 660с.
12. Шумы в электронных приборах. Под ред. Л.Д. Смоллина и Г.А. Хауса. М.-Л.: Энергия. 1964.
13. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах/ Н.Б. Лукьянчикова. М.: Радио и связь. 1990.
14. Жалуд В. Шумы в полупроводниковых устройствах/ В. Жалуд , В.Кулешов. М.: Сов. Радио, 1977.
15. Робинсон, Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях/ Ф.Н.Х. Робинсон. М.: Атомиздат, 1980. 225с.
16. Давенпорт В.Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов/  
В.Б. Давенпорт, В.Л. Рут. М.: ИЛ, 1960. 467с.
17. Голубенцев А.Ф. Введение в статистическую электронику/ А.Ф. Голубенцев, Ю.И. Денисов, Л.М Минкин. С.: Изд. СГУ, 1990. 126с.
18. Отт, Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах/  
Г. Отт. М.: Мир, 1979. 317с.
19. Херринг К. Термоэлектронная эмиссия/ К. Херринг, М. Никольс. М.: ИЛ, 1950. 260с.
20. Добрецов Л.Н. Эмиссионная электроника/ Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. М.: Наука, 1966.
21. Герман Г. Оксидный катод/ Г. Герман, С. Вагенер. М.,Л.: Гостехиздат, 1949.
22. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде/ Б.Я. Мойжес. М.: Наука, 1968.
23. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций/  
А.А. Свешников. М.: Наука, 1968.

24. Кокс, Л. Теория восстановления/ Л. Кокс, У. Смит. М.: Сов. Радио, 1967. 299с.
25. Харкевич А.А. Спектры и анализ/ А.А. Харкевич. М.: Физматгиз, 1962. 236с.
26. Инкин М.Г., Мироненко К.В., Шаповалов А.С. Многоуровневая дискретная модель неоднородного эмиттера и максимальный уровень аномального дробового шума/Вопросы прикладной физики выпуск №23 С.: Изд. Саратовского университета, 2016. с.39-41
27. Инкин М.Г., Мироненко К.В., Шаповалов А.С. Частотные характеристики аномального дробового шума для многоуровневой дискретной модели неоднородного эмиттера/Вопросы прикладной физики выпуск №23 С.: Изд. Саратовского университета, 2016. с.42-44