



НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ  
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№9(28)

# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МОСКВА, 2019



# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам XXXIV международной  
научно-практической конференции*

№ 9 (28)  
Ноябрь 2019 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва  
2019

УДК 51/53+62

ББК 22+3

НЗ4

Председатель редколлегии:

*Лебедева Надежда Анатольевна* – доктор философии в области культурологии, профессор философии Международной кадровой академии, г. Киев, член Евразийской Академии Телевидения и Радио.

Редакционная коллегия:

*Ахмеднабиев Расул Магомедович* – канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов Полтавского инженерно-строительного института, Украина, г. Полтава;

*Данилов Олег Сергеевич* – канд. техн. наук, научный сотрудник Дальневосточного федерального университета;

*Маршалов Олег Викторович* – канд. техн. наук, начальник учебного отдела филиала ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет" (НИУ), Россия, г. Златоуст.

**НЗ4 Научный форум: Технические и физико-математические науки:**  
сб. ст. по материалам XXXIV междунар. науч.-практ. конф. –  
№ 9 (28). – М.: Изд. «МЦНО», 2019. – 20 с.

ISSN 2541-8394

Статьи, принятые к публикации, размещаются на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

ISSN 2541-8394

ББК 22+3

© «МЦНО», 2019

<b>Оглавление</b>	
<b>Технические науки</b>	<b>4</b>
<b>Раздел 1. Технические науки</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Радиотехника и связь</b>	<b>4</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯТОРА-ДЕМОДУЛЯТОРА OFDM-СИГНАЛОВ	4
Габдуллин Рустем Бахытович	
<b>Физико-математические науки</b>	<b>9</b>
<b>Раздел 2. Физика</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Теоретическая физика</b>	<b>9</b>
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СЛАБО НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ МОДЕЛИ ПОТТСА С ТРЕМЯ СПИНОВЫМИ СОСТОЯНИЯМИ МЕТОДОМ КОРОТКОВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ	9
Бородихин Василий Николаевич	
<b>2.2. Физическая электроника</b>	<b>14</b>
МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ МАГНЕТРОННО-ИНЖЕКТОРНЫХ ПУШКАХ ГИРОТРОНОВ	14
Уткина Ирина Евгеньевна Лещева Ксения Александровна Мануилов Владимир Николаевич	

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### РАЗДЕЛ 1.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### 1.1. РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯТОРА-ДЕМОДУЛЯТОРА OFDM-СИГНАЛОВ

*Габдуллин Рустем Бахытович*

*студент*

*Омский государственный технический университет,  
РФ, г. Омск*

#### STUDY OF MODULATOR-DEMODULATOR WITH OFDM SIGNALS

*Rustem Gabdullin*

*Student of the Department "Communications and information security",  
Omsk state technical University,  
Russia, Omsk*

**Аннотация.** В современных системах радиосвязи повышаются требования к дальности действия таких систем, скорости передачи информации, объемам одновременно обслуживаемых абонентов. В статье рассмотрена технология ортогонального частотного мультиплексирования, обеспечивающая высокие скорость и помехоустойчивость передачи информации.

**Abstract.** In modern radio communication systems, the requirements for the range of such systems, the speed of information transmission, the volume of simultaneously serviced subscribers are increasing. The article considers the technology of orthogonal frequency multiplexing, which provides high speed and noise immunity of information transmission.

**Ключевые слова:** мультиплексирование; модуляция; данные; поток информации; преобразование Фурье; сигнал; поднесущие.

**Keywords:** multiplexing; modulation; data; information flow; Fourier transform; signal; subcarriers.

Системы радиосвязи применяются в различных направлениях деятельности человека. На данный период такие системы стремительно развиваются: повышается дальность действия радиосвязи, скорость передачи информации, объем одновременно обслуживаемых абонентов. При этом завышаются и требования к системе синхронизации, которая используется для автоматического удержания на определенном уровне параметров сигналов (частоты несущей, тактовой частоты), воссоздаваемых в радиоприемном устройстве (РПУ), а также для указания времени начала обмена информационными сигналами, которое обуславливается расстоянием «передатчик – приёмник».

Определенную перспективу как вид сигнально-кодовой структуры имеет ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM).

Технология OFDM - это тип цифровой модуляции сигнала, который способствует повышению скорости передачи информации вследствие разумного применения каналов связи и метода передачи данных. Данный метод модуляции исходит из принципа разделения потока входных данных на некоторое множество параллельных потоков [1]. Всякий поток из этого множества передается на собственной несущей (ортогональной) частоте. Тем самым обеспечивает высокие скорость (при исходном низкоскоростном потоке символов) и помехоустойчивость передачи информации.

Основным поводом для образования и использования технологии OFDM является задача по нахождению способов противодействия широкополосным помехам. В свою очередь такие помехи – это существенная причина плохой связи в условиях широкого числа крупногабаритных препятствий (многоэтажных жилых домов и других зданий). Ортогональное частотное мультиплексирование в аппаратном плане реализуется просто: ключевые операции выполняются методами цифровой обработки. Также OFDM обладает малой восприимчивостью к воздействию узкополосных помех.

Вместе с тем имеются определенные сложности в применении OFDM в системе передачи. Главный недостаток – это то, что сигнал OFDM показывает довольно высокий пик средней мощности. Отсюда следует, что усилители мощности (УМ) должны работать в очень большой линейной области. В ином варианте, пики сигнала оказываются в нелинейной области, что вызывает искажение сигнала. Также OFDM имеет высокую чувствительность к ошибкам частоты, которые создаются разностью частот между генераторами в радиопередающем устройстве (РПДУ) и приемнике РПУ.

Модуляция OFDM применяется в структурах цифрового телевидения DVB-T (цифровое эфирное ТВ) и DVB-T2 (цифровое эфирное ТВ второго поколения), системах сотовой связи WiMAX (глобальная совместимость для микроволнового доступа) и MobileWiMAX, автоматизированных системах контроля и учета электроэнергии, структурах типа "интеллектуальный дом" [3].

Идеализированный модем OFDM должен содержать РПДУ и РПУ.

В РПДУ (рисунок 1) последовательный поток двоичных символов с помощью демультимплексирования перестраивается в  $N$  параллельных потоков. Каждый поток согласуется (комплексно) с исходным потоком посредством использования определенного созвездия модуляции (квадратурную амплитудную модуляцию QAM, квадратурную фазовую модуляцию QPSK).

Далее модулированные потоки символов подвергаются быстрому обратному преобразованию Фурье (ОБПФ) [2]. ОБПФ выражает потоки в цифровые отсчеты (комплексные числа) во временной области. Действительная и мнимая составляющие отсчетов подвергаются цифро-аналоговому преобразованию (ЦАП).

Составленные аналоговые сигналы применяются для модуляции соответственно синусоиды и косинусоиды (сдвиг синусоиды на  $90^0$ ) несущей частоты. После этого сигналы складываются, создавая передаваемый в линию связи сигнал.

РПУ (рисунок 2) принимает сигнал. Этот сигнал демодулируется, используя синусоиды и косинусоиды несущей частоты  $f_c$ . Такая демодуляция воссоздает вдобавок сигналы, центрированные на частоте  $2f_c$ . В связи с этим применяются фильтры нижних частот (ФНЧ) – для подавления таких сигналов. Демодулированные же сигналы затем подвергаются дискретизации и квантованию в аналого-цифровых преобразователях (АЦП) и прямому быстрому преобразованию Фурье (ПБПФ).

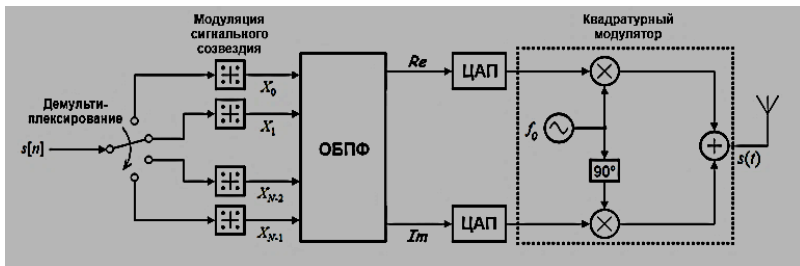


Рисунок 1. Схема идеального OFDM-модулятора

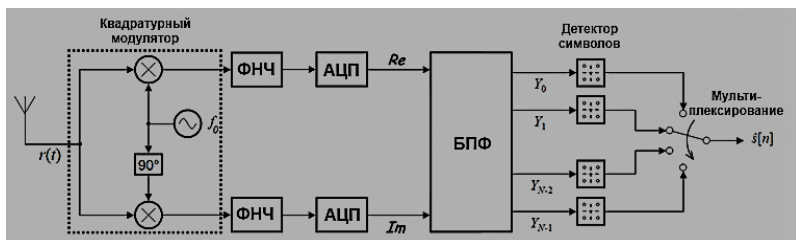


Рисунок 2. Схема идеального OFDM-демодулятора

ПБПФ перестраивает действительную и мнимую составляющие оцифрованных отсчетов сигнала из временной области в частотную. В итоге организуются  $N$  цифровых параллельных потоков, каждый из которых преобразуется в поток двоичных данных, используя соответствующий РПДУ детектор символов, выполняющий их демодуляцию и декодирование. Данные потоки в дальнейшем преобразуются в последовательный поток, который является оценкой исходного потока двоичных данных РПДУ.

Как правило, схема образования сигнала OFDM представляется следующим образом. На модем следует некоторая последовательность цифровых сигналов от разнообразных источников. После этого эти сигналы преодолевают мультиплексор, где связываются в один цифровой поток по некоторому алгоритму.

В целях устранения избыточности цифровой поток пропускается через кодер канала (в кодере сообщение преобразуется в кодовую комбинацию). В кодере осуществляется помехоустойчивое кодирование. По большей части, при модуляции OFDM применяются коды Рида-Соломона, сверточное кодирование. После этого цифровые данные следуют через формирователь пакетов. Образование цифрового потока заканчивается.



В формирователе пакетов цифровому сигналу присваивается избыточная информация (заголовок и концовка). Пакеты поступают на последовательно-параллельный преобразователь, где распределяются по подканалам. Количество подканалов равно количеству поднесущих в сигнале OFDM.

Итак, OFDM имеет простую аппаратную реализацию, может противодействовать сложным условиям в радиоканале (бороться с узкополосными помехами). Также данная технология позволяет использовать ряд схем модуляции для разных поднесущих. В свою очередь это позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала. В каналах с относительно медленными изменениями имеет место значительное повышение пропускной способности вследствие адаптации скорости передачи данных на каждой поднесущей в соответствии с отношением сигнал/шум для этой конкретной поднесущей.

Однако стоит отметить также следующие пункты: для OFDM необходима высокая синхронизация частоты и времени; технология имеет сравнительно большое отношение пиковой мощности к средней, что приводит к снижению энергетической эффективности высокочастотных усилителей. Стоит также отметить, что несовершенство современных приёмников и передатчиков влечет фазовый шум, что ограничивает производительность системы.

Несмотря на данные недостатки, OFDM - это хорошее решение для архитектур современных сетей, которые работают в условиях мегаполиса. Прогресс в технологиях и динамика рынка постоянно толкают производителей модернизировать имеющиеся технологии. В конечном итоге создаются аппараты, в основе которых лежат различные модификации OFDM.

### **Список литературы:**

1. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Технология OFDM: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2017. – 352 с.
2. Галустов Г.Г., Мелешкин С.Н. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов: Учебное пособие. – Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета, 2012. – 80 с.
3. В. Лебедев Модуляция OFDM в радиосвязи – Журнал "Радиолобитель" №8 – Минск 2008 г. – 65 с.

## **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **РАЗДЕЛ 2.**

### **ФИЗИКА**

#### **2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

#### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СЛАБО НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ МОДЕЛИ ПОТТСА С ТРЕМЯ СПИНОВЫМИ СОСТОЯНИЯМИ МЕТОДОМ КОРОТКОВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ**

***Бородихин Василий Николаевич***

*канд. физ. – мат. наук, доцент,  
Омский государственный университет им. Достоевского,  
РФ, г. Омск*

#### **STUDY OF CRITICAL BEHAVIOR OF A WEAKLY DISORDERED POTTS MODEL WITH THREE SPIN COMPONENTS BY THE METHOD OF SHORT-TIME DYNAMICS**

***Vasily Borodikhin***

*candidate of Science, associate Professor,  
Omsk state University,  
Russia, Omsk*

**Аннотация.** Методом коротковременной динамики исследовано поведение слабо неупорядоченной трехмерной модели Поттса с числом спиновых компонент равным трем, со спиновой концентрацией 0.95. Вычислены динамический индекс  $z$ , и критический индекс  $\nu$  с учетом поправок к скейлингу.

**Abstract.** The behavior of a weakly disordered three-dimensional Potts model with the number of spin components equal to three, with a spin concentration of 0.95, was investigated by the method of short-time dynamics. The dynamic index  $z$  and the critical index  $\nu$  are calculated taking into account corrections to scaling.

**Ключевые слова:** модель Поттса; динамический критический индекс.

**Keywords:** Potts model; dynamic critical index.

## Введение

Проблема фазовых переходов в неупорядоченных системах представляет большой теоретический и экспериментальный интерес. Это связано с тем, что большинство реальных твердых тел содержит примеси и другие дефекты структуры, присутствие которых влияет на их термодинамические характеристики и, в частности, может существенно влиять на поведение систем при фазовых переходах. В частности представляет интерес исследование критического поведения слабо неупорядоченной модели Поттса с числом спиновых состояний  $q=3$ , с использованием методов не применявшихся ранее для исследования данной модели, в частности методом коротковременной динамики.

## Трехмерная модель Поттса с примесями и моделирование

Модель Поттса с числом спиновых состояний  $q=3$  находит широкое применение при описании ряда объектов и явлений в физике конденсированных сред таких как сложные анизотропные ферромагнетики кубической структуры, многокомпонентные сплавы и жидкие смеси.

Структурные фазовые переходы в некоторых материалах, таких, как  $\text{SrTiO}_3$  или  $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$  относятся к классу универсальности трехкомпонентной модели Поттса.

Данная модель имеет следующие основные особенности. В узлах кубической решётки расположены спины, которые могут находиться в одном из 3-х спиновых состояний, и немагнитные примеси. Немагнитные атомы примеси распределены случайным образом и являются фиксированными в узлах решетки. Энергия связи между двумя узлами равна нулю, в случае если они находятся в разных

состояниях, или если в одном узлов находится немагнитная примесь, и равна  $J$ , если взаимодействующие узлы находятся в одинаковых состояниях, где  $J$  - обменный интеграл.

Гамильтониан модели имеет вид:

$$H = -\frac{J}{2} \sum_{i,j} \rho_i \rho_j \delta(S_i S_j) \quad (1)$$

где:  $S_i, q=1, 2, 3, \delta(S_i, S_j)=1$  при  $S_i = S_j$  и  $\delta(S_i, S_j)=0$  при  $S_i \neq S_j$ ;  $\rho_i = 1$ , если в узле находится спин, и  $\rho_i = 0$ , если в узле находится немагнитная примесь.

Для моделирования системы в работе применялся алгоритм Метрополиса. В качестве намагниченности  $m$  для разбавленной модели Поттса использовалось следующее выражение [1]:

$$m = \frac{q(N_{\max} / N - 1)}{q - 1} \quad (2)$$

где:  $N_{\max} = \max \{N_1, N_2, N_3\}$ ,  $N_1$  - число спинов в состоянии с  $q = 1$ ,  $N_2$  - число спинов в состоянии с  $q = 2$ ,  $N_3$  - число спинов в состоянии с  $q = 3$ ,  $N = pL^3$ . При исследовании динамических свойств модели Поттса применялся метод коротковременной динамики [2].

### Результаты моделирования

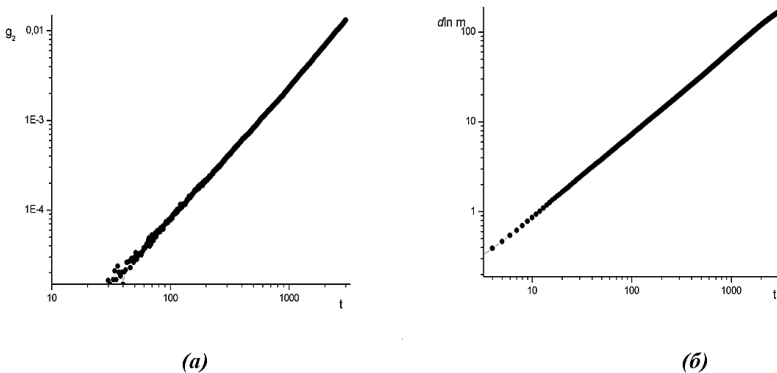
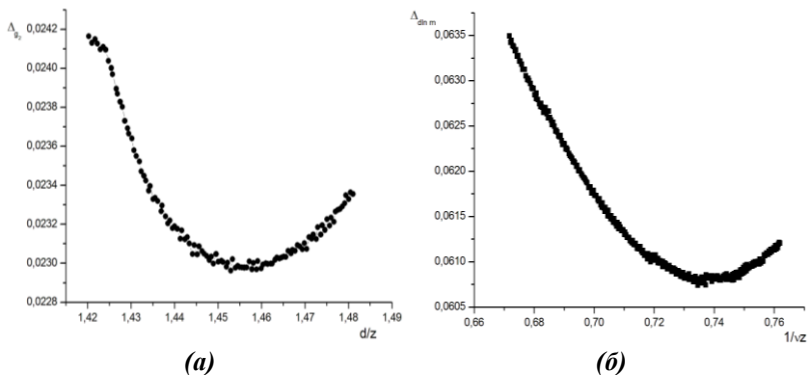


Рисунок 1. Временная зависимость (а) кумулянта 2-го порядка  
(б) логарифмической производной



**Рисунок 2. Минимум погрешности (а) показателя  $d/z$  (б) показателя логарифмической производной**

Исследовалась спиновая конфигурация  $p=0,95$ . Линейный размер системы брался равным  $L=128$ . Производилось вычисление динамической зависимости кумулянта второго порядка, и логарифмической производной,  $\Delta T=0,002$ . Статистическое усреднение осуществлялось по 6800 примесным конфигурациям. Результаты моделирования приведены на рис. 1.а-б. С учетом поправок к скейлингу найдены значения показателей  $d/z=1,452\pm 0,0011$  ( $\omega/z=0,392\pm 0,004$ ),  $1/vz=0,73457\pm 0,0008$  ( $\omega/z=0,40\pm 0,0045$ ), соответствующие минимумы погрешностей показаны на рис. 2.а-б. Из полученных значений показателей, соответственно, значение динамического критического индекса  $z=2,0657\pm 0,0022$ , и значение критического индекса  $v=0,6590\pm 0,003$ .

### Заключение

Исследование модели Поттса с  $q=3$  в статическом случае [2], при малых концентрации примесей показало, что внесение примесей приводит к новому типу критического поведения, при этом в системе реализуется фазовый переход второго рода. Проведенные, методом коротковременной динамики исследования подтвердили данные результаты, уже для малой концентрации примесей  $p=0,95$  фазовый переход 1-го рода меняется на фазовый переход 2-го рода. Значение динамического критического показателя  $z$ , для модели Поттса с учетом поправок к скейлингу имеет немного меньшее значение по сравнению с индексом  $z$ , найденным для модели Изинга при той же концентрации примесей [3]. Возможно это связано с влиянием дополнительной спиновой компоненты. Значение индекса  $v$  близко к значению, найденному в [2] для модели Поттса с концентрацией примесей  $p=0,95$  статическими методами.

**Список литературы:**

1. Муртазаев А.К., Бабаев А.Б., Азнаурова Г.Я., Особенности фазовых переходов в трехмерных разбавленных структурах, описываемых моделью Поттса // ЖЭТФ. 2009. Т.136. С. 520.
2. Zheng B. Monte Carlo simulations of short-time critical dynamics // Comp. Phys. Comm. 1999. V. 121. P. 338.
3. Prudnikov P.V., Prudnikov V.V., Krinitsyn A.S., Vakilov A.N., Pospelov E.A., Short-time dynamics and critical behavior of three-dimensional site-diluted Ising model // Phys. Rev. E. 2010. V. 81. P. 011130.

## **2.2. ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

### **МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ МАГНЕТРОННО- ИНЖЕКТОРНЫХ ПУШКАХ ГИРОТРОНОВ**

**Уткина Ирина Евгеньевна**

*аспирант,*

*Национальный исследовательский университет*

*Высшая школа экономики,*

*РФ, г. Нижний Новгород*

**Лещева Ксения Александровна**

*аспирант,*

*Национальный исследовательский*

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*

*РФ, г. Нижний Новгород*

**Мануилов Владимир Николаевич**

*профессор,*

*Национальный исследовательский*

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*

*РФ, г. Нижний Новгород*

### **METHOD OF COMPUTER SIMULATION OF THREE- DIMENSIONAL PERTURBATIONS OF GEOMETRY AND DISTRIBUTION OF BULK CHARGE DENSITY IN NONADIABATIC MAGNETRON-INJECTOR GUNS OF GYROTRONS**

**Urina Utkina**

*PhD student,*

*National Research University Higher School of Economics,*

*Russia, Nizhny Novgorod*

**Kseniia Leshcheva**

*PhD student,*

*N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
Russia, Nizhny Novgorod*

**Vladimir Manuilov**

*Professor,*

*N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
Russia, Nizhny Novgorod*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00142*

**Аннотация.** Разработана методика компьютерного моделирования параметров винтовых электронных пучков при трехмерных возмущениях геометрии и распределения плотности тока эмиссии в неадиабатических электронных пушках гиротронов. Эффективность методики проиллюстрирована на примере расчета электронной пушки гиротрона с рабочим магнитным полем 0,65 Тл, ускоряющим напряжением 15 кВ и током пучка 3А.

**Abstract.** The technique of computer modeling of parameters of helical electron beams at three-dimensional perturbations of geometry and distribution of current density of emission in nonadiabatic electron guns of gyrotrons is developed. The efficiency of the technique is illustrated by the example of calculating an electron gun of a gyrotron with a working magnetic field of 0.65 T, an accelerating voltage of 15 kV and a beam current of 3A.

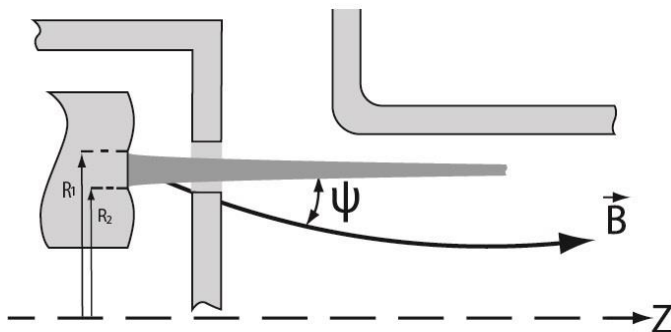
**Ключевые слова:** гиротрон; винтовой электронный пучок; неадиабатическая электронная пушка.

**Keywords:** gyrotron; helical electron beam; gyrotron electron gun.

Традиционно в качестве электронно-оптических систем гиротронов используются адиабатические магнетронно-инжекторные пушки (МИП) [1]. Наряду с несомненными достоинствами (надежность, простота, малая критичность) МИП обладают и рядом принципиальных недостатков, среди которых, вследствие специфики формирования винтового электронного пучка (ВЭП) в адиабатических полях, наиболее серьезным и принципиально не устранимым является влияние шероховатостей эмиттера и тепловых начальных скоростей электронов. Указанные факторы приводят к существенному увеличению разброса вращательных скоростей электронов, что приводит к необходимости снижения питч-фактора (отношения вращательной и продольной скоростей электрона



в рабочем пространстве) для сохранения устойчивости ВЭП. Резко снизить влияние шероховатостей и тепловых скоростей можно при неадиабатической схеме формирования ВЭП, поскольку в данном случае вначале формируется прямолинейный пучок, и лишь затем осуществляется его первоначальная закрутка в неадиабатическом электрическом или магнитном поле. Дальнейшее увеличение осцилляторной скорости частиц до требуемой величины производится за счет адиабатического сжатия пучка в плавно нарастающем магнитном поле. Существует несколько схем неадиабатических ЭОС [2]. Одной из новых и недавно предложенных является аксиально-симметричная система формирования (рис.1) [3], в которой прямолинейный пучок инжектируется через кольцевую щель под углом к магнитному полю и за счет этого осуществляется первичная закрутка пучка. Первые численные расчеты таких систем показали, что в них, по сравнению с МИП, возможно существенное снижение скоростного разброса и за счет этого увеличение пичч-фактора прибора при сохранении устойчивости ВЭП.

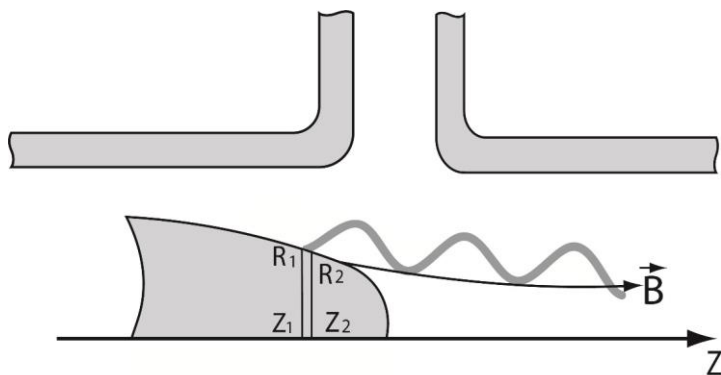


**Рисунок 1. Неадиабатическая электронно-оптическая система**

Однако на данный момент неизученным остается вопрос влияния неоднородности эмиссии на работу данных систем. Электронно-оптические системы в гиротронах, в отличие от других вакуумных приборов СВЧ, работают в режиме температурного ограничения эмиссии, а не ограничения тока пространственным зарядом пучка. Поэтому, вследствие неоднородности прогрева катода по азимуту, в них наблюдается существенное нарушение азимутальной симметрии распределения плотности тока эмиссии, что приводит к азимутальной неоднородности электронного потока [4]. В адиабатических магнетронно-инжекторных пушках это является причиной появления неоднородных полей, которые, в свою очередь, увеличивают скоростной разброс электронов. Нарушение симметрии распределения пространственного заряда

может, в принципе, ухудшить характеристики и неадиабатических электронно-оптических систем (ЭОС) гиротронов. Эта задача требует отдельного рассмотрения.

На основе пакета программ для трехмерного моделирования CST Studio Suite [5] в работе [6] была разработана методика учета нарушения симметрии плотности тока. В данной работе она расширена и доработана с учетом специфики задания эмиссии в неадиабатических системах. Программа препроцессор позволяющая за счет предварительного независимого вычисления начальных координат, скоростей частиц и токов трубок тока была дополнена возможностью задавать эмиссию с торцевой поверхности (рис.1) в отличие от наклонной как в случае адиабатических ЭОС (рис. 2).



**Рисунок 2. Адиабатическая электронно-оптическая система**

Программа постобработки выходных параметров системы расширена возможностью деления на сектора торцевого эмиттера и последующим анализом каждой фракции как вместе, так и по отдельности.

Для оценки точности разработанного алгоритма было проведено моделирование работы неадиабатической электронной пушки гиротрона с рабочим магнитным полем 6,5 кГс, ускоряющим напряжением 15 кВ и током пучка 3А. Расчеты параллельно проводились по 2-мерной программе EPOS [7] и трехмерной программе CST Studio Suite. Рассчитывался вариант с однородной по азимуту эмиссией. Расчеты программой EPOS и CST Studio Suite при использовании разработанных программ пред- и пост-обработки, демонстрируют хорошее соответствие (питч-фактор равен 1.7 и 1.68, скоростной разброс 9 и 11 % соответственно), что говорит о возможности применения разработанной методики для расчетов неадиабатических ЭОС.

**Список литературы:**

1. A.L. Goldenberg, M.I. Petelin Formation of helical electron beams in adiabatic gun. Radiophys. Quantum Electron. 1973. V.16, No 6. p. 141.
2. М.Ю. Глявин, А.Л. Гольденберг, В.Н. Мануилов, М.В. Морозкин. Экспериментальное исследование электронно-оптической системы низковольтного гиротрона с неадиабатической электронной пушкой. Изв. Вузов. Радиофизика, 2011. Том 54. №8-9. С.690-695.
3. A.L. Goldenberg, M.Yu.Glyavin, K.A. Leshcheva, V.N. Manuilov Nonadiabatic electron-optical system of a technological gyrotron. Radiophys. Quantum Electron. 2017. V.60, No 5. p. 395.
4. Лукша О.И. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества: Дисс. ... докт. физ.-мат. Наук. СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2011. 285 с.
5. <https://www.cst.com/Products/CST>
6. Лещева К.А., Мануилов В.Н. Численное 3D-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков гироприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии. Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 298.
7. Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.. Int. J. of Infrared and MM waves. 2001. Vol. 22. No. 8. P. 1119.

*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:  
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Сборник статей по материалам XXXIV международной  
научно-практической конференции*

№ 9 (28)  
Ноябрь 2019 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 18.11.19. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 550 экз.

Издательство «МЦНО»  
123098, г. Москва, ул. Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74  
E-mail: tech@nauchforum.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии «Allprint»  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3



НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ  
[nauchforum.ru](http://nauchforum.ru)