

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
академик РАН С.А. Никитов  
*С.А. Никитов* 2025 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ)  
им. В. А. Котельникова РАН

на диссертационную работу Гаштури Антона Петровича  
«Анализ и синтез квазиоптических преобразователей гироприборов методами  
интегральных уравнений»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.4 – радиофизика

Работа А.П. Гаштури направлена на развитие эффективных методов анализа и синтеза квазиоптических преобразователей, используемых в гиротронах - мощных генераторов сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения. Реализована методика комплексного анализа электромагнитных полей в подобных сверхразмерных электродинамических системах с использованием интегральных соотношений между электромагнитным полем и поверхностным электрическим током. Наиболее значимым достижением является интеграция данных методов граничных элементов в оригинальную процедуру синтеза, позволяющую создавать уникальные квазиоптические преобразователи с высокой эффективностью.

К достоинствам диссертации следует отнести следующее. Выведенный в гл. 4 метод скалярных уравнений демонстрирует высокую скорость получения результата в сравнении с интегральным уравнением электрического поля при незначительной потере точности. Многие результаты расчетов подтверждены экспериментально, что позволяет сделать вывод об обоснованности научных положений и заключений, приведенных в работе, а также о достоверности полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков цитированной литературы и публикаций автора по теме диссертации. Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена новизна полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению методов анализа электромагнитных полей в сверхразмерных электродинамических системах, применяемых в конструкциях мощных гиротронов. Исследуется эффективность методов граничных элементов, таких как интегральное уравнение электрического поля (EFIE), применяемое для анализа распространения волн в открытых волноводах и зеркальных линиях передач. Представлено подробное описание современного инструментария, используемого для анализа трёхмерных электродинамических систем, включая метод моментов и многоуровневое мультипольное разложение (MLFMA). Приведен ряд практических примеров, иллюстрирующих возможности гибридного подхода, основанного на решении уравнения EFIE и принципе физической оптики, для анализа электромагнитных полей в сложных квазиоптических системах гиротронов.

**Вторая глава** посвящена построению процедуры синтеза волноводных преобразователей на основе предложенных ранее методов анализа интегральных уравнений и физической оптики, для проектирования излучателей гиротронов, работающих на высоких уровнях мощности. Результатом использования данного подхода является создание компактного и эффективного волноводного излучателя, способного изменять угловой спектр рабочей моды, сохраняя высокую эффективность преобразования в гауссово-подобное излучение и минимальные дифракционные потери. Подробно представлены этапы разработки, методов изготовления и экспериментального тестирования образцов разработанного волноводного излучателя в составе системы вывода излучения гиротрона, работающего на частоте 28 ГГц, при постоянной мощности 20 кВт. Достигнута эффективность преобразования около 98%.

**Третья глава** затрагивает вопросы синтеза многочастотных волноводных излучателей. Изучается концепция двунаправленного квазиоптического преобразователя, позволяющего разделить рабочие моды по разным каналам, обеспечивая тем самым рост количества рабочих частот гиротрона. В качестве подобной системы приводится проект многочастотного преобразователя для гиротрона с рабочим диапазоном 175–250 ГГц, показывающий в расчетах высокие эффективности преобразования ( $\geq 96\%$ ) для всех пяти рабочих мод. В конце главы представлена общая стратегия проектирования двунаправленных квазиоптических преобразователей, согласующая частоты и геометро-оптические свойства рабочих мод.

**В четвёртой главе** предложена быстрая процедура синтеза волноводных излучателей, основанная на решении интегрального уравнение итерационной физической оптики (ИФО). В условиях высокой сверхразмерности и плавности синтезируемой поверхности используется замена реального профиля волновода в уравнении на виртуальный фазовый корректор, что позволяет переписать уравнение ИФО в виде системы скалярных интегральных уравнений в цилиндрических координатах и решать ее с помощью быстрого преобразования Фурье. Это многократно повышает скорость получения приближения для профиля излучателя, которое может быть улучшено впоследствии с помощью процедуры на основе векторного интегрального уравнения электрического поля.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации, наиболее важные из которых, на наш взгляд, заключаются в следующем:

- разработка методики синтеза на базе решения интегрального уравнения для электрического тока и проектирование с помощью данной процедуры волноводного излучателя 28 ГГц гиротрона с эффективным изменением углового спектра излучения;
- предложение нового подхода к созданию двунаправленных квазиоптических преобразователей, способствующих увеличению числа рабочих мод и снижению дифракционных потерь;
- внедрение быстрой и эффективной процедуры синтеза волноводных излучателей на основе уравнения итерационной физической оптики, обеспечившей значительное снижение временных затрат на проектирование квазиоптических систем гиротронов.

Не вызывает сомнения научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Все положения, выносимые на защиту, подтверждаются результатами диссертации. Личный вклад диссертанта подробно описан во Введении. Автором лично реализованы все программные коды для анализа и синтеза полей в

квазиоптических преобразователей гиротронов на основе методов граничных элементов.

Диссертация представляет собой целостную и завершенную работу, выполненную самостоятельно на высоком уровне, и вносит ощутимый вклад в развитие методов проектирования сверхразмерных квазиоптических систем вывода излучения гироприборов. Основные результаты опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах по данной тематике, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, что служит подтверждением достоверности полученных результатов.

Автореферат корректно отражает основное содержание и результаты диссертации.

Работа несвободна от некоторых недостатков.

1. Автор описывает итерационный метод решения интегральных уравнений, однако не приводит никакой информации о скорости и критериях его сходимости.
2. Автор затрагивает понятие о некорректных задачах, однако в тексте диссертации явно не указывает, какая из решенных им задач принадлежит к классу некорректных.
3. При решении задачи дифракции электромагнитных волн на поверхности волновода опускается вопрос о том, какие граничные условия ставятся на ребре.
4. Непонятно, учитывались ли в алгоритмах, разработанных автором, отражения от зеркал в сторону открытого конца волновода.
5. Обзор литературы практически отсутствует, что затрудняет широкому кругу читателей выделить место работы автора среди остальных. Так, например, отсутствуют ссылки на классические работы Б.З. Каценеленбаума: Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. – М.: издво АН СССР, 1961. – 216 с.; Б.З. Каценеленбаум, В.В. Семенов. Синтез фазовых корректоров, формирующих заданное поле // Радиотехника и электроника. 1967. № 12. С.244.

Несмотря на сделанные замечания, научный уровень и значимость диссертации достаточно высоки. Диссертационная работа Гаштури Антона Петровича «Анализ и синтез квазиоптических преобразователей гироприборов методами интегральных уравнений» соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых ВАК, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (действует с 01.01.2014 г.) с точки зрения актуальности, новизны, достоверности, практической значимости и личного вклада диссертанта, а ее автор Гаштури А.П. заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «радиофизика».

Диссертация и отзыв о ней обсуждены и одобрены на заседании научно-квалификационного семинара «Генерация электромагнитных колебаний и их применения» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Председатель семинара  
Главный научный сотрудник  
Академик РАН

В.А. Черепенин