

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Гаштури Антона Петровича

**“АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ГИРОПРИБОРОВ МЕТОДАМИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ”,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Освоение субтерагерцевого и терагерцевого диапазонов вне всяких сомнений является одним из главных направлений исследований в современной радиофизике. В последние десятилетия (особенно в связи с разработкой мощных и сверхмощных приборов релятивистской электроники) изучение и создание приборов, способных работать в данных диапазонах частот стало доминирующим. Одной из причин этого является разработка современных генераторов гирорезонансного типа – гиротронов. Уникальные параметры данных приборов позволяют использовать их в самых различных областях науки и техники. Внутри указанного направления важнейшим было и остается исследование сверхразмерных электродинамических систем и электронных приборов, использующих такие системы.

Начиная с пионерских теоретических и экспериментальных работ по открытым резонаторам (впервые предложенными в связи с работами по созданию генераторов когерентного излучения – лазеров), квазиоптические (сверхразмерные) системы находят все более широкое применение в электронике, например, в качестве элементов систем вывода генерируемого излучения мощных коротковолновых приборов. В этой области, которой посвящены уже многие тысячи экспериментальных и теоретических работ,

был предложен целый ряд новых квазиоптических систем и методов их исследования. Тем не менее, говорить о том, что все проблемы, связанные с исследованием квазиоптических структур решены, более чем преждевременно. Связано это, в первую очередь, с чрезвычайной сложностью задачи. В связи с тем, что размеры квазиоптических структур существенно превышают длину волны, непосредственное применение численных методов для решения задачи в строгой постановке затруднительно или невозможно. Использование различного рода приближенных (и, как правило, эвристических) подходов требует в каждом конкретном случае трудоемкого анализа возникающих при их использовании погрешностей. Отметим также, что среди имеющихся работ очень небольшое место занимают исследования, где специально с достаточной глубиной и широтой и в рамках единой концепции изучались бы все аспекты создания и применения квазиоптических систем, включая развитие аналитических, полуаналитических и численных методов различного уровня сложности для моделирования полей в структурах субтерагерцевого и терагерцевого диапазонов, а также взаимодействия электронного потока с этими полями. Вместе с тем, необходимость в такого рода исследованиях более чем очевидна именно при создании приборов электроники больших мощностей. В этой связи, тематика диссертационной работы Антона Петровича Гаштури, целиком посвященной указанному вопросу, представляется весьма важной и актуальной. Это подтверждает и цель работы, состоящая в решении одной из фундаментальных проблем современной радиофизики – создание методов анализа квазиоптических систем вывода излучения, генерируемого сверхмощными гиротронами.

Несомненно, что тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение, Списка публикаций по теме диссертации и Списка цитируемой литературы.

Остановимся кратко на анализе основных результатов и положений диссертации, следуя ее тексту.

Во Введении к диссертации достаточно полно обоснована ее актуальность, сформулированы цель работы, ее научная новизна, практическая значимость, а также кратко изложено содержание диссертации. Дан обзор современного состояния рассматриваемых в диссертации проблем и известных ранее способов их решения. Обращает внимание то, что при обзоре литературы, имеющемся во Введении, автор, как правило, использует наиболее современные и высокоцитируемые источники. Я считаю, что эта часть диссертации, несомненно, представляет самостоятельную научную ценность. Также во Введении подробно описан личный вклад автора в получение опубликованных результатов и приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации является заметно более объемной, чем остальные. И это совершенно неудивительно! Ведь именно в первой главе рассмотрены основные методы численного решения уравнений Максвелла, используемые в дальнейшем. Автором с должной степенью подробности рассмотрены формулировки интегрального уравнения (ИУ) для электрического поля (EFIE в терминологии, принятой в диссертационной работе), ИУ для магнитного поля (MFIE), а также комбинированная формулировка (CFIE). Для алгебраизации полученных ИУ автор использует метод моментов. При использовании метода редукции, такой подход позволяет свести исходные ИУ к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). С моей точки зрения, материал данного раздела наиболее ярко демонстрирует высочайший уровень квалификации соискателя и его виртуозное владение численными методами в электродинамике. В частности, автор уделяет большое внимание действительно важным вопросам практической реализации численных алгоритмов решения ИУ: вычислению интегралов при расчете матричных элементов и методам

решения СЛАУ. Квалифицированно примененные автором подходы к решению этих проблем позволили существенно сократить время расчетов, и улучшить устойчивость решения СЛАУ. В частности, для указанных целей автором был использован метод мультипольного разложения. Основанный на теореме сложения для сферических функций, данный подход позволяет повести декомпозицию исходной матрицы, что, в свою очередь, дает возможность оптимизировать вычислительный алгоритм. Следует отметить, что данный подход требует адекватного определения некоторых свободных параметров, что, в свою очередь, предполагает ясное понимание физического смысла проводимых преобразований. С моей точки зрения автор продемонстрировал достаточно отчетливое понимание физики процессов, проходящих в моделируемой структуре, что, в конечном счете, и определило успех реализации выбранной методики. Еще одним оригинальным решением автора, позволившим существенно уменьшить объем вычислений, является использование комбинированного подхода, сочетающего метод ИУ с приближением физической оптики (ФО). Несомненно, большим достижением автора, существенно увеличивающим ценность изложенных в диссертационной работе результатов, является сравнение результатов расчета с данными, полученными с помощью экспериментального исследования изучаемых структур. В рассматриваемой главе эти данные приведены для квазиоптического преобразователя гиротрона, работающего на частоте 140 ГГц. Это, вне всякого сомнения, свидетельствует о высокой квалификации соискателя.

Естественным развитием любого численного метода анализа электродинамических структур является его использование в качестве составной части алгоритма синтеза. Этой логике следует и автор диссертационной работы: действительно, во второй главе диссертации автор рассматривает процедуру синтеза волноводного преобразователя, основанного на решении интегрального уравнения для электрического поля

(EFIE). В качестве целевого параметра автором выбран коэффициент преобразования мод. Отметим, что автор уделяет адекватное внимание реализуемости синтезируемого профиля: предложена процедура сглаживания искомого профиля, основанная на Фурье-фильтрации. В качестве примера использования развитой методики синтеза, рассмотрено проектирование квазиоптического преобразователя для гиротрона на частоту 28 ГГц. Существенным фактором, определившим, в конечном счете, успех процедуры синтеза, явилось глубокое понимание автором физики процессов, проходящих в преобразователе. Именно это позволило задать адекватные начальные параметры синтеза. Результаты расчета легли в основу конструирования экспериментальных образцов. Экспериментальное исследование реальных распределений полей в сконструированных и изготовленных образцах преобразователя показало высокую эффективность разработанного соискателем алгоритма синтеза.

В третьей главе диссертации алгоритм синтеза получает свое дальнейшее развитие. Автором рассмотрена задача синтеза многочастотных устройств. Данная проблема обусловлена необходимостью увеличения выходной мощности гиротронов, используемых в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). В качестве примера рассмотрен пример синтеза системы вывода энергии для нескольких рабочих мод гиротрона. При решении данной задачи автором дополнительно рассмотрен вопрос согласования системы с выходными диэлектрическими окнами для минимизации отражений от них. Используя развитую ранее методику, автору удастся спроектировать весьма эффективную систему вывода, обладающую минимальными потерями в рабочем диапазоне частот.

В четвертой главе диссертации автор проводит дальнейшую оптимизацию алгоритма синтеза. Предлагается использовать некоторые физические соображения для получения наилучшего начального приближения и ускорения итерационного процесса. Автор развивает метод

итерационной физической оптики для получения приближенного решения уравнений Максвелла, имеющего, однако, в ряде случаев, вполне достаточную для практики точность. Автором также предложена идея использования приближения фазового корректора для дальнейшего увеличения эффективности расчетного алгоритма. Разработанный алгоритм использован для синтеза конкретного волноводного преобразователя, причем результаты расчета верифицированы с помощью сравнения с результатами, полученными с помощью EFIE. Отмечено, что использование приближенного подхода дало выигрыш более чем в 400 раз, при сравнимой точности.

Я считаю, что несомненным и существенным достоинством диссертации является то, что все результаты расчетов, полученные с помощью разработанных им методик, сопоставляются с результатами различных подходов, описанных ранее, а также с имеющимися в литературе данными. Такое сопоставление, с одной стороны, убедительно демонстрирует тот факт, что предложенная методика достаточно эффективна и дает приемлемые для практики данные, а с другой стороны является несомненным подтверждением достоверности полученных соискателем результатов. Как уже было отмечено ранее, очень важным положительным моментом диссертации является также и то, что расчетные данные сопоставлены с результатами измерений. Это, вне всяких сомнений, одна из наиболее сильных сторон диссертационной работы.

Безусловно, целый ряд новых и важных научных результатов, полученных соискателем, с интересом будет воспринят специалистами, работающими в соответствующей области.

В целом диссертация Антона Петровича Гаштури является законченной научно-исследовательской работой, в которой с единой точки зрения решен

значительный круг фундаментальных задач квазиоптики, имеющих важное научное и практическое значение для современной радиофизики.

Я считаю, что диссертационная работа не имеет никаких существенных недостатков, однако, (как и при всяком анализе достаточно объемной и серьезной работы), по содержанию и оформлению диссертации А.П. Гаштури можно сделать ряд замечаний.

С моей точки зрения, общее замечание по диссертационной работе – слишком лаконичное изложение. Важнейшие этапы исследования: постановка задачи, методика решения, верификация полученных результатов изложены более чем кратко. Конечно, имеются ссылки на соответствующие публикации, однако для читателя, не занимающегося непосредственно исследованиями в рамках данной тематики, разобраться в изложении, основываясь лишь на тексте диссертации, к сожалению, не всегда просто.

Не вполне подробно рассмотрен вопрос об особенностях использованной в диссертационной работе методики расчета квазиоптических преобразователей, относящейся именно к гироприборам (как это указано в названии диссертационной работы). Во Введении отмечена только сверхразмерность системы, однако сверхразмерные системы используются далеко не только в гиротронах.

Отметим некоторые стилистические погрешности: в частности, во Введении, на стр. 3 используются не совсем общепринятые термины «...высокая сверхразмерность», «мощность вычислений». Также на стр. 17 используются термины «Интегральные уравнения магнитного поля и электрического поля...» – видимо, имеется в виду интегральные уравнения для магнитного поля и для электрического поля.

Не совсем понятно, в каком смысле на стр. 19 используется термин «открытый волновод» – обычно, под открытыми волноводами понимаются волноведущие системы, в которых электромагнитные поля не ограничены в

поперечном направлении. В случае, рассматриваемом в диссертационной работе, это не так.

Не указан цветовой масштаб для тока и поля на рис. 1.10. Не определено, в каких единицах представлены эти величины. Необходимо отметить, что это общее замечание практически для всех иллюстраций. Вообще, как мне кажется, использованный в диссертационной работе способ представления результатов проведенных расчетов не всегда адекватен поставленной задаче. Сложно количественно сравнить расчет с экспериментом – глядя на приведенные иллюстрации можно получить лишь весьма качественное представление о решении.

По-видимому, недостаточно места уделено описанию постановки краевой задачи для уравнений Максвелла. Используемая в диссертации постановка краевой задачи (Гл. 2, Стр. 45 – 46) отличается от общепринятой, фигурирующей в известной формулировке теоремы единственности [Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988]. Естественно возникает вопрос о единственности полученного в диссертации решения. Считаю, что это следовало бы обсудить несколько более подробно. Вообще говоря, рассматриваемая в диссертации проблема, является стандартной задачей волноводного рассеяния (см. напр.: Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.— 544 стр.. Обычно, при решении такой задачи в общепринятой постановке возникает матрица рассеяния, позволяющая получить ответ на вопрос о согласовании устройства с волноводным трактом. С моей точки зрения, это также существенно для оптимизации преобразователя, т.к. позволяет рассчитать потери на отражение, что, вообще говоря, должно учитываться при анализе общей эффективности. Данному вопросу следовало бы уделить больше внимания при изложении результатов.

К недостаткам работы можно отнести также некоторые погрешности в оформлении работы. В диссертации имеется относительно небольшое, для такой объемной работы, количество опечаток. В частности, на стр. 77. и стр. 81 использованы не определенные в тексте обозначения формул.

Несмотря на отмеченные недостатки, общее впечатление от диссертации весьма благоприятное. Ее характеризует высокий теоретический уровень, логика и в подборе задач, и в использовании единой методики их решения.

Антон Петрович Гаштури безусловно является высококвалифицированным специалистом в области теоретической радиофизики. Основные результаты диссертации А.П. Гаштури опубликованы в высокоцитируемых научных изданиях, неоднократно докладывались на конференциях, в том числе и международных, и хорошо известны специалистам. Именно широкое обсуждение диссертационных результатов на 19 научных международных и российских конференциях убедительно свидетельствует о несомненной научной достоверности представленного материала.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа А.П. Гаштури «АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ГИРОПРИБОРОВ МЕТОДАМИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ» полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Антон Петрович Гаштури заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Доктор физико-математических наук

Директор ФГБУН

«Институт физических проблем

им. П.Л.Капицы РАН»

20 августа 2025 г.

Клеев Андрей Игоревич

Подпись директора Клеева Андрея Игоревича

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ФГБУН «Институт физических проблем

им. П.Л. Капицы РАН»



О.А. Андреева

адрес: ФГБУН «Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН»,

119334, Москва, ул. Косыгина 2

факс +7(495)6512125

тел.: +7(499)1372462

e-mail: kleev@kapitza.ras.ru

Научная специальность докторской диссертации Клеева Андрея Игоревича –

01.04.03 –Радиофизика.