

Отзыв официального оппонента на диссертацию
Титовой Дарьи Евгеньевны
на тему «Возбуждение электромагнитного поля во вращающихся гироскопах и
интерферометрах», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-
устройства и их технологии

Диссертационная работа Титовой Д.Е. посвящена исследованию вопросов и решению внутренних задач электродинамики о возбуждении электромагнитного поля во вращающихся волноводах, резонаторах и концентрических резонаторах (они являются математическими моделями интерферометров и гироскопов) на основе ковариантных уравнений Максвелла и импедансных граничных условий.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения. Работа содержит 194 с., в том числе 147 с. основного текста, 41 рисунок и 9 таблиц, список литературы из 310 наименований, 3 приложения и 2 акта о внедрении полученных результатов.

Во введении приведен обзор работ об устройствах и методах измерения частоты вращения, обоснована актуальность задач диссертации, приведены научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен обзору известных в литературе решений задач электродинамики во вращающихся полостях и обсуждению эффекта расщепления критических частот во вращающихся волноводах и резонаторах под действием центробежной и кориолисовой сил. Приведено описание радиочастотных способов измерения частоты вращения.

Во втором разделе решена задача возбуждения вращающегося цилиндрического волновода (математическая модель интерферометра) сторонними токами и зарядами с целью исследования одноволнового метода измерения частоты вращения. Проведен подробный и разносторонний численный и графический анализ, и подтвержден эффект расщепления критической частоты волновода в покое ω_0 на две новых частоты $\omega_n = \omega_0 + n\Omega$ при вращении (n – номер моды, Ω – частота вращения волновода).

Третий раздел посвящен исследованию резонансного метода измерения частоты вращения на примере цилиндрического резонатора, что является математической моделью гироскопа. Проведенный тщательный численный и графический анализ показывает эффект расщепления критической частоты резонатора и возможность измерения частоты вращения резонансным способом.

В четвертом разделе резонансный метод измерения частоты вращения исследуется для сферического гироскопа с помощью решения задачи возбуждения электромагнитного поля во вращающейся сферической полости. Подтверждается расщепление собственной частоты резонатора ω_0 в покое на $2n$ новых резонансных частот.

Пятый раздел диссертации посвящен исследованию возможности миниатюризации размеров устройств измерения частоты вращения. Для этого рассматривается радиочастотный резонансный способ измерения частоты вращения при вращении концентрического сферического резонатора, образованного полостью между концентрическими шаром и сферой.

Актуальность темы

Инерциальные навигационные системы традиционно пользуются большим спросом в различных областях науки и промышленности, к которым можно отнести аэрокосмическую и подводную навигацию, робототехнику, медицину, сейсмологию и так далее. Развитие систем умного города, интернета вещей, мобильных сетей 6G и систем беспилотного транспорта актуализирует непрерывное совершенствование и развитие новых систем инерциальной навигации, в частности – гироскопов и интерферометров как устройств измерения частоты вращения. С ростом числа электронных элементов, располагаемых на единице площади различных устройств, а также с появлением новых технологий и устройств, требовательных к высокоточной навигации, актуальным является вопрос миниатюризации и повышения разрешающей способности гироскопов.

Одними из новых способов измерения частоты вращения, потенциально позволяющих создавать миниатюрные гироскопы и интерферометры с высокой точностью и разрешающей способностью, могут стать радиочастотные способы измерения частоты вращения. Особенностью данных способов является то, что они фиксируют изменения собственных частот волноводов и резонаторов под влиянием вращения, пропорциональные частоте вращения. Данные способы были предложены Б.М. Петровым и основаны на строгой теории о существовании электромагнитных колебаний и волн во вращающихся волноводах и резонаторах.

Исследование возможности применения новых радиочастотных методов измерения скорости вращения с учетом источников колебаний и потерь в материалах требует постановки и решения граничных задач возбуждения электромагнитного поля во вращающихся волноводах и резонаторах как математических моделях интерферометров и гироскопов. Кроме того, необходимо определить наиболее эффективные характеристики интерферометров и гироскопов на основе радиочастотных методов измерения частоты вращения в зависимости от параметров используемых волноводов и резонаторов, а также найти способы миниатюризации гироскопов на их основе и повышения их разрешающей способности. Необходимость решения указанных задач определяет актуальность диссертации Титовой Дарьи Евгеньевны, выполненной на тему «Возбуждение электромагнитного поля во вращающихся гироскопах и интерферометрах».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Соискатель корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Ей изучены и проанализированы известные теоретические работы в области электродинамики во вращающихся системах отсчета и последние достижения в области инерциальной навигации. Список использованной в работе литературы содержит в общей сложности более 300 наименований.

Для строгого учета влияния вращения на поведение электромагнитного поля во вращающихся волноводах и резонаторах Титовой Д.Е. использована запись уравнений электродинамики для неинерциальных (вращающихся) систем отсчета. Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, получили строгое обоснование в материалах диссертации, что определяется строгой постановкой и решением внутренних задач электродинамики для вращающихся полостей с учетом релятивистских эффектов при использовании уравнений Максвелла в ковариантной форме. Полученные

аналитические и численные результаты в частном случае покоящихся волноводов и резонаторов (отсутствует вращение) совпадают с результатами, характерными для классической электродинамики, то есть для инерциальных систем отсчета.

Оценка новизны и достоверности

К новым научным результатам, представленным в диссертационной работе, можно отнести следующее:

1. Впервые поставлены и решены в строгом виде в приближении общей теории относительности задачи возбуждения сторонними источниками токов и зарядов вращающегося цилиндрического волновода, вращающегося цилиндрического резонатора, вращающегося сферического и концентрического сферического резонаторов.

2. Численно и графически исследовано влияние параметров вращающихся волноводов и резонаторов, таких как материалы, добротности, форма, на параметры радиочастотных методов измерения частоты вращения.

3. Показана возможность повышения разрешающей способности радиочастотного метода измерения частоты вращения при использовании сверхпроводящих материалов стенок вращающихся полостей. Рассчитаны предельно-достижимые характеристики метода.

4. Предложена возможность уменьшения размеров гироскопа на основе вращающегося сферического резонатора путем внесения в него концентрической сферы меньшего радиуса.

5. Численно и графически исследованы предельно-достижимые параметры радиочастотных методов измерения частоты вращения. Даны рекомендации по выбору гироскопов на основе вращающихся полостей в зависимости от требуемых характеристик разрешения и линейных размеров устройства измерения частоты вращения для различных материалов, формы и добротности резонаторов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе полученного строгого аналитического решения внутренних задач электродинамики во вращающихся системах отсчета в работе исследованы предельно-достижимые параметры радиочастотных способов измерения частоты (скорости) вращения и установлены технические параметры вращающихся гироскопов и интерферометров на их основе.

2. Предложенные пути миниатюризации устройств, реализующих радиочастотный резонансный метод измерения частоты вращения, при использовании концентрической сферической полости, показали возможность уменьшения объема резонатора, а с ним — и размера гироскопа на основе радиочастотного метода измерения частоты вращения, в среднем на величину до 10 % (в зависимости от материалов резонатора и отношения радиусов концентрических сфер).

3. Предложенные возможности повышения разрешающей способности радиочастотного резонансного метода измерения частоты вращения путем использования материалов с высокой проводимостью теоретически позволяют достигать значений разрешающей способности метода до $0,01 \div 0,001$ Гц.

4. Показана теоретическая возможность разработки устройства измерения частоты вращения радиочастотным резонансным способом, размеры которого не будут превышать нескольких миллиметров при разрешающей способности $1 \div 10$ град/час. Данные параметры не

уступают многим современным гироскопам и подходят для высокоточного навигационного применения.

Результаты работы были использованы при выполнении НИОКТР № 122022200226-3 «Прорывные поисковые лаборатории "Системы связи"» в рамках реализации государственной программы поддержки университетов «Приоритет 2030», а также внедрены в образовательный процесс по программе магистратуры 11.04.01 «Средства радиоэлектронной борьбы» и программе аспирантуры 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи». Все сказанное выше подтверждается наличием в диссертационной работе двух актов о внедрении.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается строгой постановкой и решением граничных задач электродинамики во вращающихся неинерциальных системах отсчета. Аналитические результаты и результаты численного исследования эффекта расщепления собственных частот вращающихся резонаторов и волноводов были сопоставлены с известными в литературе результатами экспериментов и верифицированы с результатами классической электродинамики для случая равенства частоты вращения нулю.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК и Перечень научных изданий, утвержденных приказом ЮФУ №372-ОД от 22.12.2022 г., а также в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Материалы диссертации докладывались на одиннадцати международных конференциях. Публикации по теме диссертационной работы в полной мере отражают основные научные результаты, полученные соискателем.

Замечания по диссертационной работе в целом

К недостаткам диссертации можно отнести следующие:

1. В тексте диссертационной работы редко встречаются ссылки на свои научные статьи.
2. Желательно было бы дать более подробное объяснение величины $G_N(f)$ (формула (2.42) в диссертации) (вертикальная ось на графиках числовых характеристик).
3. В тексте диссертации редко встречаются грамматические ошибки и незначительные ошибки в формулах.

Однако указанные недостатки в целом не снижают ценность проделанного диссертантом исследования и полученных основных научных результатов. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и изложена доступным языком.

Аннотация правильно отражает содержание диссертации. В ней в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость полученных результатов.

Заключение

Представленная диссертация является законченной научно- квалификационной работой, обладает смысловой целостностью и внутренним единством. В работе посредством строгого решения внутренних задач электродинамики во вращающихся системах отсчета с использованием уравнений Максвелла в ковариантной форме исследованы возможности и теоретически достижимые технические параметры радиочастотных методов измерения частоты вращения волноводов и резонаторов, которые являются математическими моделями вращающихся гироскопов и интерферометров. Полученные результаты и сформулированные на

их основе выводы и рекомендации по конструированию устройств на основе радиочастотных методов измерения скорости вращения имеют существенное значение как для развития теории электродинамики во вращающихся системах отсчета, так и для разработки новых гироскопов и интерферометров с уменьшенными массогабаритными характеристиками и разрешающей способностью навигационного уровня.

Решенные в диссертации задачи, проведенные численные и графические исследования и представленные на защиту положения соответствуют паспорту специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии в следующих пунктах: «Решение внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и микроволновых устройств, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения и т. д.» (пункт 1).

Считаю, что диссертационная работа на тему «Возбуждение электромагнитного поля во вращающихся гироскопах и интерферометрах», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО ЮФУ (приказ ЮФУ № 270-ОД от 29 сентября 2023 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Титова Дарья Евгеньевна, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки).

я, Геворкян Эдуард Аршавирович, даю согласие на включение своих персональных данных в аттестационное дело Титовой Д.Е. и их дальнейшую обработку в соответствии с действующим Законодательством.

Официальный оппонент

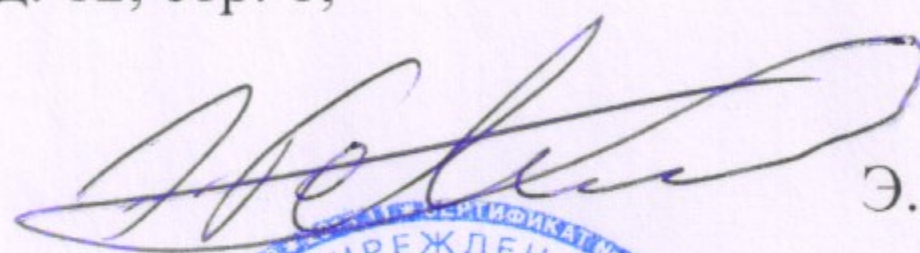
Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин факультета
информационных технологий

частного образовательного учреждения высшего образования "Московский
университет имени С.Ю. Витте"

115432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, д. 12, стр. 1,

тел. +7(495) 500-03-63, info@muiv.ru

тел. +7(903)1397397, gevor_mesi@mail.ru



Э.А. Геворкян

Подпись официального оппонента Геворкяна Эдуарда Аршавировича заверяю

Проректор по научной работе

Московского университета

Имени С.Ю. Витте

Дата

10 января 2024г.



П.Н. Кравченко