

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора

Габриэльяна Дмитрия Давидовича на диссертацию
Титовой Дарьи Евгеньевны «Возбуждение
электромагнитного поля во вращающихся гироскопах и
интерферометрах», представленную на соискание учёной
степени кандидата технических наук по специальности
2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Актуальность темы диссертационных исследований.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений и подтверждается все более широким спектром применения навигационных систем в самых различных областях жизни, включая как масштабные исследовательские проекты, так и самые распространенные потребительские устройства. Необходимо также отметить появление беспилотных транспортных средств (БТС) как воздушного, так и наземного и морского базирования, программе развития которых уделяется особое внимание.

Неотъемлемым элементом навигационных систем, играющих ключевую роль в построении БТС, являются устройства для измерения положения, скорости и других параметров движения БТС, и, в первую очередь, датчиков угловой скорости и поворота. Точность определения параметров положения и движения во многом определяют безопасность и эффективность применения БТС.

Несмотря на постоянное совершенствование глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Beidou устойчивое покрытие земной поверхности радионавигационным полем с требуемыми параметрами точности возможно не во всех районах земной поверхности. В связи с этим построение навигационных систем на основе инерциальных датчиков не только продолжает сохранять свою значимость, но и интенсивно развивается многими крупнейшими производителями. При этом для широкого внедрения в бытовых приложениях инерциальные датчики наряду с высокими точностными характеристиками должны быть миниатюрными и иметь невысокую стоимость.

Одним из интересных с теоретической точки зрения и важным в плане практического использования направлений построения высокоточных устройств измерения угловой скорости вращения является использование характеристик электромагнитных полей (ЭМП) во вращающихся системах. Устройства, построенные на основе эффектов изменения частоты

электромагнитного поля во вращающейся системе в полной мере позволят обеспечить как высокую точность измерения, так и малые массогабаритные размеры и стоимость. Однако реализация потенциальных возможностей точности измерения угловой скорости может быть достигнута только при строгой постановки и решения задач в ускоренных (вращающихся) системах отсчета (СО) на основе положений релятивистской электродинамики.

Диссертационная работа Титовой Дарьи Евгеньевны как раз и направлена на выявление зависимости параметров ЭМ поля от скорости вращения волноведущей структуры или резонатора, что позволяет использовать ЭМП для измерения скорости вращения. При этом за счет малых размеров резонаторов, в отличие от существующей зависимости разрешения в устройствах на основе эффекта Саньяка от охватываемой лучами света площади, использование рассматриваемого эффекта позволяет принципиально создавать миниатюрные устройства.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- корректным выбором записи уравнений электродинамики во вращающихся системах отсчета, полученных из уравнений Максвелла в ковариантной форме в рамках общей теории относительности без применения предположений о скорости света;
- совпадением полученных аналитических результатов в частных случаях с известными из литературы экспериментальными и теоретическими результатами;
- совпадением аналитических и численных результатов для частного случая отсутствия вращения с известными результатами классической теории электродинамики.

Научная новизна результатов диссертации определяется:

- новыми знаниями в области возбуждения вращающихся интерферометров и гироскопов сторонними источниками токов и зарядов, включая впервые сформулированные и решенные в строгом виде граничные задачи возбуждения произвольными сторонними источниками токов и зарядов ЭМП во вращающихся интерферометрах и гироскопах;
- строгим аналитическим представлением для векторов напряженностей ЭМП, возбуждаемого во вращающихся полостях, с учетом влияния эквивалентного гравитационного поля, что существующие в

настоящее время САПР, не учитывающие релятивистские поправки и неинерциальные системы отсчета, не позволяют смоделировать;

- численным анализом параметров резонансного радиочастотного метода измерения скорости вращения;

- результатами исследования возможности увеличения добротности вращающейся сферической полости путем применения сверхпроводящих материалов;

- результатами исследований возможности уменьшения размеров вращающейся сферической полости путем внесения концентрического шара.

Значимость результатов для науки и практики заключается:

- в исследовании радиочастотных способов измерения частоты (скорости) вращения и установлении технических параметров вращающихся гироскопов и интерферометров их реализующих;

- в разработке рекомендаций по использованию резонансного радиочастотного метода для измерения частоты (скорости) вращения полости в зависимости от параметров используемых материалов и конструкции полости;

- в уменьшении размеров измерителей частоты вращения до нескольких миллиметров при навигационном разрешении, что делает данный способ потенциально конкурентным на современном рынке датчиков вращения.

Оценка содержания диссертации.

Диссертационная работа изложена на 194 с., в том числе 147 с. основного текста и заключения, состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и трех приложений.

Во введении приведен краткий обзор устройств измерения частоты вращения; обоснована актуальность решаемых в диссертации задач; обозначены цели и задачи исследования; описаны выбранные методы исследования и обоснована их достоверность; приведены основные положения, выдвигаемые для публичной защиты; описана научная новизна и практическая ценность полученных результатов; отмечен личный вклад автора и перечислены основные публикации.

В первом разделе приведен достаточно полный обзор известных в литературе решений задач электродинамики во вращающихся полостях. Обсуждается полученное ранее Б.М. Петровым строгое решение задач о

возбуждении ЭМ волн во вращающихся волноводах и резонаторах, показывающее возникновения эффекта расщепления критических частот волновода и собственных частот резонатора под действием эквивалентного гравитационного поля – центробежной и кориолисовой сил. Даны описания радиочастотных способов измерения частоты вращения, основанных на данных эффектах. Отмечена необходимость проведения аналитических и численных исследований, связанных с решением задач возбуждения ЭМ поля во вращающихся интерферометрах и гироскопах, результаты которых определяют непосредственную реализацию, границы и особенности применения новых способов измерения частоты вращения гироскопа и интерферометра.

Во втором разделе выполнена постановка и получено решение задачи возбуждения сторонними источниками токов и зарядов вращающегося цилиндрического волновода, являющегося математической моделью интерферометра. Полученные результаты являются составной частью исследования одноволнового метода измерения частоты вращения, основанного на расщеплении критической частоты волновода при его вращении.

Проведенный анализ и сравнение полученных соотношений для вращающихся систем отсчета с известными выражениями классической электродинамики подтвердили корректность полученных аналитических выражений. В свою очередь, численные расчеты для частного случая возбуждения ЭМП элементарным электрическим вибратором подтвердили эффект расщепления критической частоты невращающегося волновода на две новых частоты при вращении. Уточнены особенности использования одноволнового радиочастотного метода измерения частоты вращения, основанного на смещении критической частоты волновода.

В третьем разделе на примере цилиндрического резонатора проведены исследования резонансного метода измерения частоты вращения. Основой проведения исследований являются полученные во втором разделе аналитические результаты, с использованием которых формулируется и решается задача возбуждения сторонними источниками токов и зарядов вращающегося цилиндрического резонатора. При решении задачи используется та же схема, что и во втором разделе с добавлением граничных условий на торцах цилиндрического резонатора.

В четвертом разделе проводятся исследования резонансного метода измерения частоты вращения для сферического гироскопа. Постановка задачи и схема решения выбираются аналогичной рассмотренной ранее. Проведенные исследования подтвердили наличие эффекта расщепления собственной частоты сферического резонатора пары новых резонансных частот при вращении сферического резонатора.

В пятом разделе выполнено исследование возможности миниатюризации размеров устройств измерения частоты вращения с использованием радиочастотного резонансного способа применительно к вращающемуся концентрическому сферическому резонатору, образованному полостью между концентрическими шаром и сферой. Отмечены достоинства и недостатки концентрических сферических резонаторов.

В заключении на основе полученных в разделах работы результатов и сформулированных выводов даны рекомендации, которые необходимо учитывать при разработке устройств, реализующих радиочастотные методы измерения частоты. Перечислены области возможных дальнейших исследований по теме.

В приложениях приведены более подробные данные по существующим методам и устройствам измерения частоты вращения. Рассмотрены МЭМС сенсоры, оптические датчики вращения, оптоэлектронные гироскопы, а также атомные интерференционные и некоторые иные устройства измерения частоты вращения. Описаны основные характеристики датчиков, обеспечиваемые ими параметры, достоинства и ограничения в зависимости от принципов работы, технологии изготовления и области применения.

Автореферат в полной мере отражает содержание, научную новизну, значимость результатов для науки и практики и основные положения представленной диссертационной работы.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

По результатам диссертационных исследований опубликовано 14 работ, написанных самостоятельно и в соавторстве, представленных в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Scopus и Web of Science.

Публикации соответствуют научной специальности, по которой выполнена диссертация. В публикациях изложены основные научные

результаты диссертации, что подтверждает анализ ссылок диссертанта в выводах по каждой главе диссертации.

К содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. Изложение существа диссертационной работы начинается с развернутого обзора известных результатов исследований электромагнитного поля во вращающихся системах и связанных с этим эффектов. В основе известных результатов лежит трактовка полученных результатов с использованием общей теории относительности. Однако, на мой взгляд, было более полезным провести на первом этапе в рамках классической электродинамики. Суть данного подхода заключается в том, что при вращении цилиндра, сферы, сферической полости носители заряда (электроны) приобретают ускоренное движение. Следствием этого является появление переменных электрических токов и связанных с ними электромагнитных полей. Такой подход позволяет дать на первом этапе понимание сущности возникающих эффектов, строгая теория которых далее развивается в рамках общей теории относительности.

2. Рассматривая вопросы практического применения полученных теоретических результатов для построения гироскопов и интерферометров следовало бы рассмотреть метрологические аспекты, связанные с точностью измерения частоты вращения. В частности, можно было бы рассмотреть влияние погрешности изготовления цилиндрического резонатора, сферического резонатора, погрешности данных об относительной диэлектрической проницаемости и величине проводимости на погрешность определения частоты вращения.

Оценка диссертации в целом.

В целом, несмотря на указанные выше замечания, диссертационная работа Титовой Дарьи Евгеньевны производит положительное впечатление. Она является последовательным, завершённым научным исследованием, посвящённым актуальной научной проблеме, содержит признаки научной новизны, обоснованность и достоверность научных достижений, выводов и рекомендаций.

Заключение.

Считаю, что Титова Дарья Евгеньевна достигла поставленной цели диссертационных исследований. Основные результаты проведённой работы отражают научную новизну и практическую значимость. Диссертация

