

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
ЮФУ801.02.07,**

созданного на базе Института радиотехнических систем и управления
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Южный федеральный университет»,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

*аттестационное дело № _____,
решение диссертационного совета
от 29 февраля 2024 г. № 16*

О присуждении **Титовой Дарье Евгеньевне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Возбуждение электромагнитного поля во вращающихся гироскопах и интерферометрах» по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии принята к защите 7 декабря 2023 г. (протокол заседания № 12) диссертационным советом ЮФУ801.02.07, созданным на базе Института радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» в соответствии с приказом ЮФУ № 371-ОД от 22.12.2022 г.

Соискатель Титова Дарья Евгеньевна, 1989 года рождения, в 2012 году окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (диплом магистра техники и технологии по направлению «Радиотехника»). В 2019 году окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по направлению подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи (направленность программы: Антенны, СВЧ-устройства и их технологии). С 2015 года по настоящее время работает в должности научного сотрудника федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Юханов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств.

Официальные оппоненты:

Геворкян Эдуард Аршавирович, доктор физико-математических наук, профессор, Частное образовательное учреждение высшего образования

«Московский университет имени С.Ю. Витте», г. Москва, профессор кафедры математических и естественно-научных дисциплин;

Габриэльян Дмитрий Давидович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, заместитель начальника НТК по науке

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Соискатель имеет 14 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них в научных изданиях, входящих в Перечень научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, представленных для защиты в диссертационные советы Южного федерального университета (далее – Перечень рецензируемых научных изданий), опубликовано 2 работы; в научных изданиях, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science, опубликовано 12 работ.

Основные научные публикации по теме диссертации:

1. Titova, D. Influence of the dielectric loss in a dielectric filled rotating spherical resonator on the precision of the rotation rate measurement / Titova D. E., Petrov B. M. // 2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Lviv, Ukraine. – 2016. – P. 318-321. – DOI 10.1109/MMET.2016.7544055 (входит в базу Scopus).

2. Петров, Б. М. Влияние тепловых потерь в диэлектрике на частотную характеристику сферического резонатора и на возможность измерения частоты вращения / Б. М. Петров, Д. Е. Титова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 5(178). – С. 113-125 (входит в Перечень рецензируемых научных изданий).

3. Petrov, B. M. Dependence of the Q-factor of a rotating cavity on the heat losses in the metal / Petrov B. M., Titova D. E. // 2016 2nd International Conference on Humanity and Social Science (ICHSS2016). – 2016. – P. 210-214. – WOS:000390840600039 (входит в базу Web of Science).

4. Petrov, B. M. Excitation of a rotating metal wall dielectric resonator and its rotation rate measurement / Petrov B. M., Titova D. E. // Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL. – 2016. – P. 249-251. – DOI 10.1109/CAOL.2016.7851445 (входит в базу Scopus).

5. Petrov, B. M. Excitation of Electromagnetic Field in a Rotating Coaxial Spherical Resonator / Petrov B. M., Titova D. E. // 2016 2nd International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, YSF 2016 - Forum Proceedings. – 2016. – P. 46-49. – DOI 10.1109/YSF.2016.7753797 (входит в базу Scopus).

6. Petrov, B. M. Influence of the parameters of the dielectric on the Q-factor of a rotating coaxial resonator / Petrov B. M., Titova D. E. // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017. – 2017. – P. 1278-1281. – DOI 10.1109/ElConRus.2017.7910799 (входит в базу Scopus).

7. Petrov, B. M. Q-factor of a rotating spherical resonator filled with dielectric / Petrov B. M., Titova D. E. // Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017. – 2017. – P. 96-99. – DOI 10.1109/RSEMW.2017.8103575 (входит в базу Scopus).
8. Petrov, B. M. Impedance Boundary Problem for Rotating Spherical Cavity / Petrov B. M., Titova D. E. // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. – 2018. – P. 480-484. – DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317138 (входит в базу Scopus)
9. Petrov, B. M. Electromagnetic Waves in Rotating Spherical Cavities. E-field / Petrov B. M., Titova D. E. // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019. – 2019. – P. 8-11. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792690 (входит в базу Scopus)
10. Petrov, B. M. Electromagnetic Waves in Rotating Spherical Cavities. H-field / Petrov B. M., Titova D. E. // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019. – 2019. – P. 12-15. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792713 (входит в базу Scopus)
11. Титова, Д. Е. Краевая задача возбуждения вращающегося цилиндрического волновода с импедансными стенками / Д. Е. Титова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3(233). – С. 240-251. – Режим доступа: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/818/1006 (дата обращения 10.11.2023) (входит в Перечень рецензируемых научных изданий)
12. Titova, D. E. Excited Electromagnetic Field in Rotating Cylindrical Waveguide / D. Titova // Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023. – 2023. – P. 44-47. – DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202024 (входит в базу Scopus)
13. Titova, D. E. Spectrum of a Rotating Cylindrical Cavity Resonator / D. Titova // Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023. – 2023. – P. 48-51. – DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202075 (входит в базу Scopus)
14. Titova, D. E. Excitation of Electromagnetic Field inside Rotating Spherical Cavity / D. E. Titova // IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques. – 2024. – Vol. 9. – P. 1-9. – DOI 10.1109/JMMCT.2023.3321123. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10274858> (дата обращения 10.11.2023) (входит в базу Scopus, Q2)

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Приведены ссылки на все использованные в диссертации результаты научных работ, выполненные соискателем лично и в соавторстве. В диссертации отсутствуют заимствования без ссылок на авторов или источник заимствования.

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов.

1. Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва. *Отзыв положительный.* Подписал профессор кафедры Радиотехнических приборов и антенных систем, доктор физико-математических наук, профессор Пермяков Валерий Александрович.

Основные замечания:

– необходимо уточнение моделей с целью приближения их к более реалистичным; более реалистичная модель концентрического сферического резонатора должна учитывать конструкцию крепления шара внутри резонатора и ее влияние на характеристики резонатора.

2. АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи». *Отзыв положительный.* Подписала старший научный сотрудник научно-технического центра, кандидат технических наук Алпатова Анна Витальевна.

Основные замечания:

– в автореферате присутствует путаница с понятиями коэффициент и функция. В пояснении к формуле (4) указано, что $F_n^{(s)E,H}$ это коэффициенты, а в формуле они фигурируют как функции $F_n^{(s)E,H}(\varphi)$; в пояснении к формуле (5) указано, что $Z_n^E(z)$ это функция, а строчкой ниже (стр. 11 нижний абзац) уже $Z_n^E(z)$ называются коэффициентами.

3. Севастопольский государственный университет. *Отзыв положительный.* Подписал профессор кафедры «Электронная техника», доктор технических наук, доцент Широков Игорь Борисович.

Основные замечания:

– разрешающая способность исследуемых радиочастотных гироскопов достигает малых размеров и навигационной точности для рассматриваемых в работе частот 10 ГГц только при условиях сверхпроводимости, создание которых в настоящее время требует криогенных установок или повышенного давления; в таких условиях гироскопы, основанные на радиочастотных способах измерения частоты вращения, не сохраняют малые размеры и будут трудно интегрируемы на другие объекты;

– на рисунках 2, 4 и 6 автореферата интервал между соседними максимумами частотных характеристик обозначен как Ω (рад/с), в то время как на характеристиках частоты откладываются в Гц, вероятно, автор имел в виду $\Omega/2\pi$.

4. Томский государственный педагогический университет. *Отзыв положительный.* Подписал профессор научно-образовательного центра теоретической физики, доктор физико-математических наук, профессор Владимир Яковлевич Эпп.

Основные замечания:

– в автореферате утверждается, что при расчетах «используется ковариантная форма записи уравнений Максвелла»; обычно под ковариантной формой записи понимается форма записи, не зависящая от выбора системы отсчета, но в работе использована трехмерная, векторная форма уравнений Максвелла, в которой векторы явно зависят от выбора системы отсчета;

– в автореферате не приведено выражение для функций $F_n^{(1,2)E,H}$ в формулах (4) и (8), в связи с чем не ясно, трансформируется ли каким-то образом электромагнитное поле, возбужденное вращающимся источником токов и зарядов;

– на рисунке 7 (в) приведены зависимости радиуса резонатора от частоты вращения для различных значений диэлектрической проницаемости материала, заполняющего резонатор, ϵ_r' , однако на рисунке 7 (б) приведена только одна

кривая для добротности резонатора, хотя можно предположить, что для разных диэлектрических заполнений полости диэлектрические потери будут отличаться, что приведет к различным значениям добротностей для различных диэлектриков.

5. Российский технологический университет «МИРЭА», г. Москва. *Отзыв положительный.* Подписал заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики, доктор технических наук, доцент Легкий Николай Михайлович.

Основные замечания:

- в автореферате не указано, какие импедансные граничные условия использовались во вращающихся системах отсчета и как они изменялись при вращении;

- в положении 2 указывается «возможность синтеза высокоэффективных устройств измерения частоты вращения», однако в автореферате не приведены схемы устройств;

- отсутствуют результаты экспериментальной проверки описанных эффектов и сделанных заключений.

6. Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, г. Москва. *Отзыв положительный.* Подписал заместитель директора по научной работе по информационно-вычислительным технологиям, доктор физико-математических наук, доцент Кисель Владимир Николаевич.

Основные замечания:

- иногда не слишком рационально выбраны обозначения (например, буквой ρ обозначается координата точки источника, а той же буквой с индексом – заряд: ρ^H – объемная плотность магнитного заряда);

- как справедливо отмечает автор, эффекты расщепления частот во вращающихся системах выявлены Б.М. Петровым, и в выражении (4) для членов рядов, выражающих потенциалы Дебая, уже заложен спектр соответствующих волн с коэффициентами распространения k_n и частотами $\omega_n = \omega_0 + n\Omega$, $n = -\infty \dots \infty$, и поэтому не совсем корректно выглядит утверждение автора, что эффект расщепления подтвержден «численными расчетами» (стр. 11) – ведь эти расчеты основаны на представлении (4);

- во второй главе для решения задачи о вращающемся волноводе применяются, как и в целом в диссертации, граничные условия импедансного типа, однако не анализируется влияние значения импеданса на характеристики системы (в отличие от других моделей, рассмотренных далее);

- неоднократно встречается утверждение, что при вращении системы с частотой Ω та или иная частота (например, собственная частота резонатора) расщепляется на две новые частоты $\omega_0 \pm n\Omega$, хотя представляется, что правильнее говорить не о двух частотах, а о наборе частот в соответствии со значениями номеров типов колебаний n , которые могут существовать в системе одновременно;

- в автореферате не приводятся сведения об экспериментальном подтверждении результатов работы.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией в отрасли науки, соответствующей теме диссертации: Геворкян Эдуард Аршавирович ведет научные исследования и разработки в области возбуждения и распространения электромагнитных волн в различных средах, включая нестационарные и неоднородные среды в волноводах произвольного поперечного сечения, является специалистом в области моделирования электромагнитного излучения движущихся источников; Габриэлян Дмитрий Давидович ведет научные исследования и разработки в области измерения скорости и определения местоположения различных объектов электродинамическими методами, является специалистом в области разработки различных видов антенн, антенных решеток и СВЧ-устройств, включая облучатели и волноводы различных конструкций. Оба оппонента имеют публикации в рецензируемых научных изданиях по соответствующей теме диссертации сфере исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработаны математические модели интерферометров и гироскопов на основе вращающихся волноводов и резонаторов и решены задачи возбуждения вращающихся цилиндрических волноводов, сферических резонаторов и концентрических сферических резонаторов сторонними источниками токов и зарядов с учетом влияния эквивалентного гравитационного поля и параметров материалов полостей;

- получены решения граничных задач возбуждения вращающихся цилиндрических волноводов, сферических резонаторов и концентрических сферических резонаторов при использовании ковариантных уравнений электродинамики и импедансных граничных условий, позволившие исследовать численно эффекты расщепления критических частот волноводов и собственных частот резонаторов и учесть влияние на них параметров материалов;

- определены степень и характер влияния на разрешающую способность и точность радиочастотных методов измерения частоты вращения формы, материалов и добротности резонаторов;

- предложены пути увеличения разрешающей способности радиочастотных резонансных методов измерения частоты вращения при использовании сверхпроводящих материалов стенок вращающихся полостей;

- предложены пути уменьшения размеров устройства, реализующего радиочастотный резонансный метод измерения частоты вращения, при использовании концентрической сферической полости.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что:

- получены решения задач возбуждения электромагнитного поля во вращающихся волноводах и резонаторах на основе ковариантных уравнений Максвелла и импедансных граничных условий, позволяющие учесть влияние эквивалентного гравитационного поля (силы Кориолиса и центробежной силы) на электромагнитное поле в полостях во вращающихся системах отсчета, а также влияние материалов полостей на разрешающую способность радиочастотных способов измерения частоты вращения;

– получены результаты численных исследований эффектов расщепления критических частот волноводов и собственных частот резонаторов для цилиндрических волноводов, сферических резонаторов и концентрических сферических резонаторов при различных значениях материалов полостей и добротности резонаторов при возбуждении в них электромагнитных полей сторонними источниками токов и зарядов;

– оценены степень и характер влияния формы, материалов и добротности вращающихся резонаторов на возможность измерения частоты вращения радиочастотными способами;

– предложены возможности уменьшения линейных и электрических размеров радиочастотных гироскопов посредством использования вращающихся сферических концентрических резонаторов;

– предложены пути повышения разрешающей способности и миниатюризации гироскопов, основанных на радиочастотных резонансных методах измерения частоты вращения, при использовании сверхпроводящих материалов стенок и при использовании концентрической сферической полости, соответственно;

– дана физическая интерпретация полученных результатов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

– определены предельно-достижимые значения разрешающей способности радиочастотных методов измерения частоты вращения;

– предложены возможные пути увеличения разрешающей способности до значений, достаточных для навигационных целей, и миниатюризации радиочастотных гироскопов до нескольких миллиметров при использовании радиочастотного способа измерения частоты вращения при применении сверхпроводящих материалов и концентрических сферических резонаторов соответственно;

– даны рекомендации по выбору гироскопов заданных линейных размеров и разрешающей способности на основе вращающихся резонаторов в зависимости от формы, материалов и добротностей вращающихся полостей, основанные на рассчитанных предельно-достижимых значениях радиочастотного способа измерения частоты вращения.

Результаты исследований получены при выполнении НИОКТР № 122022200226-3 «Прорывные поисковые лаборатории "Системы связи"» в рамках реализации государственной программы поддержки университетов «Приоритет 2030», а также внедрены в учебный процесс кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

Полученные результаты могут быть использованы при выполнении НИОКТР для проведения натурных испытаний и исследований с применением интерферометров и гироскопов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– получено строгое решение с применением ковариантных уравнений электродинамики во вращающихся системах отсчета в приближении общей теории

относительности;

- принятые допущения адекватно отражают реальные физические процессы;

- установлено совпадение полученных аналитических результатов в частных случаях с известными экспериментальными и теоретическими результатами;

- установлено качественное и количественное совпадение аналитических и численных результатов для частного случая отсутствия вращения с известными результатами классической теории электродинамики.

Личный вклад соискателя состоит в

- решении граничных задач возбуждения вращающихся цилиндрического волновода, цилиндрического, сферического и концентрического резонаторов;

- получении, обработке и интерпретации результатов численных исследований эффектов расщепления критических частот волноводов и собственных частот резонаторов и определении предельно-достижимых характеристик радиочастотных способов измерения частоты вращения, основанных на этих эффектах;

- разработке рекомендаций по применению радиочастотных способов измерения частоты вращения полостей в зависимости от формы, материалов и добротности вращающихся резонаторов;

- апробации результатов исследования.

На заседании 29 февраля 2024 года диссертационный совет отметил, что рассматриваемая диссертация является квалификационной научной работой, которая соответствует критериям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»», и принял решение **присудить Титовой Дарье Евгеньевне ученую степень кандидата технических наук** по научной специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета

В. А. Обуховец

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. М. Пилипенко



29.02.2024г.