

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.02,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 20 июня 2025 г., № 10

**О присуждении Будуновой Кристине Андреевне, гражданке Российской
Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему «Атомарные функции в задачах фильтрации и
восстановления сигналов» принята к защите 31 марта 2025, протокол № 4,
диссертационным советом 24.1.111.02, созданным на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Российской академии наук
(125009, Москва, ул. Моховая, д.11. корп.7) (приказ Рособнадзора о создании
совета № 2397–1958 от 21.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении
деятельности совета № 714/нк от 02.11.2012 г.).

Соискатель Будунова Кристина Андреевна, 1993 года рождения, в 2017 году
окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана») по специальности
«Прикладная математика» с присвоением квалификации магистра.

С 01.10.2019 г. по 28.09.2023 г. обучалась в аспирантуре ИРЭ им. В.А.
Котельникова РАН по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и
вычислительная техника, направленность – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ. В 2024 г. сдала в ИРЭ им. В.А.
Котельникова РАН кандидатский экзамен по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

С 2017 г. работает в ИРЭ им. Котельникова РАН. В 2017-2019 гг. являлась
инженером, с 2019 г. по 2023 г. – младшим научным сотрудником, с 2023 г. –
научным сотрудником лаборатории 325 «Радиофизические методы в
аэрокосмических исследованиях природно-техногенной среды» ИРЭ им. В.А.
Котельникова РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории 325 «Радиофизические методы в
аэрокосмических исследованиях природно-техногенной среды» ИРЭ им.
В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель: Кравченко Виктор Филиппович, заслуженный
деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, главный
научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Официальные оппоненты:

Палкин Евгений Алексеевич, кандидат физико-математических наук,
заслуженный профессор, проректор по научной работе Автономной
некоммерческой организации высшего образования «Российский новый
университет»,

Самохин Александр Борисович, заслуженный деятель науки РФ, доктор
физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика»
Института информационных технологий Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова), **в своем положительном отзыве**, подписанном заслуженным профессором МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., заведующим отделением прикладной математики Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Александром Николаевичем Боголюбовым, и доцентом кафедры математики Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Ильей Ефимовичем Могилевским, утвержденном д.ф.-м.н., профессором Андреем Анатольевичем Федяниным, проректором МГУ им. М.В. Ломоносова, **указала**, что диссертационная работа Будуновой К.А. является законченным научным исследованием. В работе содержится решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой новых частотно-избирательных фильтров на основе финитных бесконечно дифференцируемых функций, дающих возможность улучшить методы обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах. По теме исследования Будуновой К.А. опубликовано 14 статей, из них 5 статей в журналах, индексируемых в системе Scopus, 6 статей в журналах, входящих в «белый список» научных журналов, 3 статьи в журналах из перечня ВАК. Полученные в диссертации результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Диссертационная работа удовлетворяет условиям, которые отражены в пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Представленная к защите диссертация «Атомарные функции в задачах фильтрации и восстановления сигналов» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В главе 1 проанализирована ошибка усечения ряда Кравченко-Котельникова, но не уделяется внимание ошибке наложения, возникающей на практике в ряде случаев при интерполяции сигналов.
2. В главе 2 построено параметрическое семейство фильтров с АЧХ на основе сумм сдвигов функций $h_a(x)$. Эти фильтры для различных значений параметров применяются далее в численном эксперименте на с. 36 и в примере 4.2 на с. 104. Полезно было бы разработать метод поиска оптимальных параметров фильтра.
3. Не полностью описаны условия, при которых справедливо равенство (3.1) на с. 42.
4. В примере применения фильтра на основе атомарной функции в цифро-аналоговом преобразовании на с. 65 не указано, с каким фильтром низких частот выполняется свертка модельного сигнала.
5. Результаты цифро-аналогового преобразования получены для фильтров низких частот 30-го порядка. Как изменится качество восстановления

сигнала при применении фильтра на основе атомарной функции и фильтра Баттерворта меньшего порядка?

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК («Физические основы приборостроения»), 5 статей в изданиях, входящих в Международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus («Doklady Mathematics», «Journal of Communications Technology and Electronics») и 6 статей в изданиях из «белого списка» научных журналов, а также 9 докладов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Общий объем опубликованных работ составляет 20,4 печатных листов, из них 20,4 печатных листов принадлежат соискателю лично. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Будунова, К.А. Оценка ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко, В.И. Пустовойт // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63. – № 9. – С. 935-941.
2. Будунова, К.А. О новом методе аппроксимации квадратов атомарных функций $h_a(x)$ неотрицательными рациональными дробями / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66. – №11. – С. 1085-1099.
3. Будунова, К.А. Повышение точности восстановления QAM-символов при применении метода ортогонального частотного мультиплексирования с фильтрацией / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – №10. – С. 935-946.
4. Будунова, К.А. Цифровые частотно-избирательные фильтры на основе спектров атомарных функций / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко, В.И. Пустовойт // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 10. – С. 984-990.
5. Будунова, К.А. Атомарные функции $h_a(x)$ в задачах фильтрации / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко // Физические основы приборостроения. – 2020. – Т. 9. – № 1. – С. 12-26.
6. Budunova, K.A. New Digital Infinite Impulse Response Filters on Atomic Function $h_a(x)$ / K.A. Budunova, V.F. Kravchenko // Proc. of Progress In Electromagnetics Research Symposium 2021 in Hangzhou. – 2021. – P. 270-279.
7. Будунова, К.А. Методы синтеза фильтров низких частот на основе атомарных функций / К.А. Будунова, В.Ф. Кравченко // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова, серия Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. – 2023. – выпуск XVI. – С. 26-30.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из:

- ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН» от д.т.н. Вытовтова К.А. Отзыв положительный (замечание: с точки зрения системного моделирования и управления желательно увидеть более подробную постановку задач с точки зрения устойчивости и адаптивности. Например, при работе в условиях внешних возмущений, адаптивной

настройки фильтра по мере поступления данных, либо при наличии структурной неопределенности модели сигнала. Этот аспект можно рассматривать как направление для дальнейшего развития).

- АО «НПП «Пульсар»» от к.воен.н. Лемперта П.И. Отзыв положительный (замечание: желательно в дальнейшей работе расширить обсуждение физических и аппаратных ограничений при реализации фильтров, особенно в реальных каналах связи и при работе с нестабильными источниками сигналов. Это позволит ближе связать теоретическую часть работы с инженерной практикой).
- ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» от д.т.н. Сидняева Н.И. Отзыв положительный (замечание: в численных экспериментах разработанные аналоговые и цифровые БИХ-фильтры на основе атомарных функций сравниваются лишь с классическими фильтрами Баттерворта, другие используемые на практике фильтры (Чебышева, эллиптические и др.) не рассматриваются).
- ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» от к.т.н. Кузьмина Е.В. Отзыв положительный (замечания: в автореферате никак не обсуждаются фазочастотные характеристики полученных фильтров, а они часто являются чрезвычайно важными для прецизионных радиотехнических систем. Автор не указывает объем статистических испытаний при получении вероятностных зависимостей (BER)).
- ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН» от д.ф.-м.н. Пожара В.Э. Отзыв положительный (замечание: алгоритмы восстановления сигналов показали высокую эффективность на модельных примерах. Было бы полезно рассмотреть их поведение при работе с экспериментальными спектральными данными, содержащими систематические шумы, температурные дрейфы и нестабильность оптоэлектронных компонентов).

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:

Палкин Евгений Алексеевич, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 «Радиофизика»), заслуженный профессор, проректор по научной работе Автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» – является известным специалистом в области математического моделирования сложных систем в радиофизике.

Самохин Александр Борисович, доктор физико-математических наук (специальность 01.01.07 «Вычислительная математика»), заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Института информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» – является известным специалистом в области радиолокации, теории обработки сигналов и изображений, теории антенн.

Официальные оппоненты широко известны своими достижениями в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и

практическую ценность оппонируемой диссертации.

Ведущая организация: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», широко известно научной работой в рамках научного направления «Информационно-телекоммуникационные системы». Одним из отделений Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова является отделение Радиофизики и электроники, ведущее научные исследования в области статистической радиофизики, статистического анализа и обработки сигналов, теории связи и информации, радиотехнических устройств и сигналов. Многочисленные работы сотрудников организации в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Впервые получена оценка ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова. Исследовано асимптотическое поведение ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова.

2. Представлен оригинальный алгоритм расчета КИХ-фильтров с АЧХ на основе атомарных функций, который дает возможность в явном виде определять коэффициенты их характеристик. Метод синтеза отличается простотой, но при этом применение новых фильтров в некоторых случаях дает лучшие результаты по сравнению с оконными фильтрами.

3. Разработан новый метод аппроксимации, позволяющий находить неотрицательные дробно-рациональные приближения финитных функций с быстро сходящимся рядом Фурье. Метод дает возможность строить устойчивые аналоговые фильтры с АЧХ на основе финитных функций.

4. Впервые синтезированы непрерывные ФНЧ с АЧХ, приближающейся к атомарной функции $h_a(x)$. На основе разработанных аналоговых прототипов построены БИХ-фильтры. Полученные фильтры при небольших значениях параметра a обладают быстро затухающей импульсной характеристикой (ИХ). Данное свойство позволяет применять атомарные фильтры для восстановления сигналов по неполным выборкам отсчетов.

5. Получена новая формула погрешности, образующейся при применении метода OFDM с фильтрацией для передачи символов QAM-модуляции.

6. Предложен основанный на свойствах циклической свертки модифицированный алгоритм OFDM с фильтрацией, позволяющий восстанавливать QAM-символы с меньшей погрешностью по сравнению с классическим алгоритмом. При проведении численного эксперимента модифицированный метод OFDM с фильтрацией обеспечил качественное восстановление данных для схем высокого порядка QAM 1024 и QAM 4096.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что полученная оценка ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова будет полезна при практическом применении обобщенной теоремы отсчетов на основе атомарных функций в задачах обработки сигналов и изображений. Предложенный в работе алгоритм приближения финитных функций рациональными дробями дает возможность развить новые методы синтеза аналоговых фильтров с заданной формой АЧХ. Фильтры на основе атомарных функций благодаря эффективности их использования в алгоритмах ЦАП и МОС могут найти применение в методах обработки сигналов в системах беспроводной связи и телевизионного вещания. Модифицированный метод OFDM с фильтрацией позволит улучшить качество передачи данных по сетям мобильной связи.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что научные результаты, представленные соискателем, не противоречат другим известным из литературы научным результатам, применяемые математические методы строго обоснованы, а полученные численные и графические результаты подтверждаются сопоставлением с другими расчетами.

Личный вклад соискателя состоит в том, что автору диссертации принадлежат формулировки и доказательства теорем об оценках ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова, формулы вычисления коэффициентов КИХ-фильтров низких частот на основе атомарных функций, разработка численного метода дробно-рациональной аппроксимации финитных функций с быстро сходящимся рядом Фурье и теоретическое обоснование данного метода, модификация алгоритма OFDM с фильтрацией.

В ходе защиты диссертации в рамках дискуссии членами диссертационного совета была дана высокая оценка уровню работы и было отмечено, что предложенные в работе фильтры на основе атомарных функций дают возможность улучшить методы обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Были заданы вопросы о характеристиках построенных цифровых и аналоговых фильтров, преимуществах новых фильтров перед классическими, возможности постановки задачи оптимизации для параметрического семейства фильтров, о вычислительной сложности предложенного в работе модифицированного алгоритма OFDM с фильтрацией, а также о программном обеспечении, использованном для моделирования и проведения расчетов. На все заданные вопросы Будунова К.А. дала аргументированные ответы.

Диссертационная работа Будуновой Кристины Андреевны является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит решение научных и практических задач, связанных с обработкой и восстановлением сигналов в системах радиосвязи с помощью новых частотно-избирательных фильтров. Работа удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842 с изменениями, утвержденными постановлением Правительства РФ от 11 сентября 2021 г., № 1539, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

За решение важной научной и практической задачи по разработке новых методов синтеза частотно-избирательных фильтров на основе атомарных функций для систем радиосвязи на заседании 20 июня 2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Будуновой Кристине Андреевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 17 человек, из которых 11 докторов по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН

«20» июня 2025 г.



Черепенин В.А.

Кузьмин Л.В.