

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке,
инновациям и цифровизации

ФГБОУ ВО ВГУ,

д.ф.-м.н., доцент.



/ Д. В. Костин/

« 09 » 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет» на диссертацию Иванова Дмитрия Владимировича «Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы диссертации

Идентификация динамических систем остаётся одним из активно развивающихся разделов прикладной математики и теории управления, что подтверждается устойчивым потоком публикаций по этому направлению. Классические результаты в этой области связаны с именами Р. Калмана, К. Острёма, П. Эйкхоффа, Н. С. Райбмана и Я. З. Цыпкина, а методы идентификации при ошибках по всем переменным разрабатывались Дж. Голубом, А. И. Ждановым, Т. Сёдерстрёмом, С. ван Хуффель и другими.

Отдельный класс представляют модели динамических систем дробного порядка, которыми точнее, чем модели целого порядка, описывают процессы с долговременной памятью. Обзор, приведённый в первой главе диссертации, показывает, что для систем дробного порядка при наличии помех одновременно во входных и выходных сигналах до настоящего времени были известны лишь методы на основе высших статистик, накладывающие существенные ограничения на сигналы и помехи. Сильная долговременная зависимость приводит к плохой обусловленности задачи идентификации таких систем, поэтому на первый план выходит вопрос вычислительной устойчивости методов.

Диссертация Иванова Д. В. посвящена построению, теоретическому обоснованию и программной реализации новых моделей дискретных стохастических систем дробного порядка и вычислительно устойчивых

Входящий № 206-227
Дата 17 СЕН 2026
Самарский университет

методов их идентификации при неполных (зашумлённых) данных. Совокупность решаемых задач представляет собой самостоятельную научную проблему, имеющую теоретическую и практическую значимость, а её решение расширяет класс задач математического моделирования, поддающихся корректному решению. С учётом изложенного тема диссертации является актуальной как в научном, так и в прикладном отношении.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

1. Предложен единый класс моделей дискретных динамических систем дробного порядка, обобщающий два ранее не согласованных подхода к их описанию на случай произвольного числа дробных разностей и запаздываний, а также впервые введена модель билинейной дискретной системы дробного порядка и комплекс моделей с новыми классами возмущений – ARX-модель с ошибками в переменных, линейная модель с дробно-дифференцированными ошибками в переменных, ARX-модель Винера с возмущением во входном сигнале.

2. Разработан и теоретически обоснован метод на основе обобщённых полных наименьших квадратов, применимый единым образом к линейным и к ряду нелинейных (Гаммерштейна, Винера, билинейных) систем, описываемых уравнениями с разностями дробного порядка, для помех различных классов – мартингал-разностей, белого шума, автокоррелированных и дробных шумов; для получаемых оценок доказана сильная состоятельность.

3. Создан метод на основе обобщённых инструментальных переменных для линейных систем дробного порядка при неполной информации об автокорреляционных функциях помех, для которого также установлена сильная состоятельность оценок.

4. Впервые построен алгоритм идентификации авторегрессии с разностями дробного порядка при аддитивном шуме наблюдений в условиях неизвестных дисперсии шума и отношения дисперсий помех; предложены рекуррентные алгоритмы идентификации типа стохастической аппроксимации с доказанной состоятельностью оценок.

5. Разработана вычислительно устойчивая расширенная система уравнений, эквивалентная смещённой нормальной системе, но обладающая меньшей размерностью и не содержащая комплексных коэффициентов, спектральное число обусловленности которой охарактеризовано аналитически; предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов с меньшим числом обусловленности, чем у регуляризации Тихонова.

6. На основе разработанных моделей и методов создан проблемно-ориентированный программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость результатов и выводов диссертационной работы

Теоретическая значимость работы состоит в построении единого подхода к идентификации линейных и нелинейных моделей систем дробного порядка при наличии помех наблюдения, охватывающего в том числе нестационарные помехи, и в доказательстве сильной состоятельности оценок для рекуррентных и нерекуррентных вариантов методов.

Практическая значимость определяется тем, что разработанные алгоритмы и созданное на их основе программное обеспечение применимы к широкому кругу прикладных задач – в машиностроении, эконометрике, геофизике, системах передачи информации, анализе временных рядов и автоматизированных системах управления технологическими процессами. Согласно результатам заключения, применение предложенных методов снижает среднюю погрешность оценивания параметров на 9–22 % (метод обобщённых полных наименьших квадратов) и на 5–28 % (метод обобщённых инструментальных переменных) по сравнению с методом наименьших квадратов, а переход к расширенной системе сокращает время решения в 1,5–1,8 раза по сравнению с комплекснозначной расширенной системой.

Степень обоснованности и достоверности результатов

Достоверность научных положений и выводов диссертации обеспечена строгими математическими доказательствами теоретических результатов, в первую очередь доказательствами сильной состоятельности оценок для предложенных методов и аналитическими оценками спектрального числа обусловленности расширенной системы и неявной итерационной схемы. Теоретические результаты подтверждены серией вычислительных экспериментов, выполненных с помощью разработанного программного комплекса; полученные оценки согласуются с известными в литературе и не противоречат им. Автор корректно применяет аппарат теории вероятностей и математической статистики, теории оценивания, вычислительной линейной алгебры и методов оптимизации.

Оценка содержания

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов по главам, заключения, списка литературы из 268 наименований и приложения. Общий объём работы составляет 271 страницу; работа содержит 78 рисунков и 48 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрены существующие подходы к описанию дискретных динамических систем дробного порядка и методы их идентификации. Предложено обобщение двух ранее не согласованных подходов на случай многих дробных разностей и запаздываний, впервые

введена модель билинейной дискретной системы дробного порядка и комплекс моделей с новыми классами возмущений.

Завершается глава обзором существующих методов параметрической идентификации, показавшим, что для систем дробного порядка при помехах во входных и выходных сигналах известны лишь методы на основе высших статистик; на этом основании обоснована постановка задачи создания методов, совмещающих высокую точность и вычислительную устойчивость в условиях коррелированных помех.

Во второй главе разработан и теоретически обоснован метод идентификации на основе обобщённых полных наименьших квадратов. Получены критерии оценивания для линейных ARX-моделей при помехах во входном и выходном сигналах и доказана сильная состоятельность оценок (теоремы 2.1–2.4), в том числе для случаев известной и постоянной дисперсии помех, дробно-дифференцированного белого шума и FARARX-модели. Построены рекуррентные алгоритмы идентификации типа стохастической аппроксимации (теорема 2.5), рассмотрены билинейные системы, системы Гаммерштейна и Винера, а также метод обобщённых инструментальных переменных при неполной информации о корреляционных функциях возмущений (теоремы 2.6, 2.7).

В третьей главе решены вопросы вычислительной реализации предложенных методов. Представлена расширенная эквивалентная нормальная смещённая система меньшей размерности, не содержащая комплексных коэффициентов, с аналитической оценкой спектрального числа обусловленности (теорема 3.1); предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов с меньшим числом обусловленности, чем у регуляризации Тихонова (теорема 3.2). Для случая неизвестных порядков разработан итерационный метод, включающий генетический алгоритм оценивания нелинейных коэффициентов, а для авторегрессии дробного порядка при неизвестных отношении сигнал–шум и дисперсии аддитивного шума предложен отдельный метод идентификации.

В четвёртой главе приведено описание структуры программного комплекса, реализующего разработанные методы на языке MATLAB, и результаты имитационного моделирования. Для различных отношений «помеха–сигнал» приведены оценки погрешностей оценивания параметров и погрешностей моделирования, подтверждающие преимущество разработанных методов над методом наименьших квадратов, а также преимущество предложенной расширенной системы уравнений над смещённой нормальной системой.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы и намечены направления дальнейших исследований.

Степень завершенности диссертации

Поставленные в диссертации задачи выполнены в полном объёме. Работа представляет собой завершенное научное исследование, в котором построены

и теоретически обоснованы новые модели дискретных стохастических систем дробного порядка, разработаны вычислительно устойчивые методы их идентификации при неполных данных с доказательством сильной состоятельности оценок и создан реализующий эти методы программный комплекс. Совокупность результатов диссертации можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы теории идентификации и математического моделирования динамических систем дробного порядка при наличии помех.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает основные научные и практические положения диссертации. В автореферате изложены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях. Представленные в автореферате материалы соответствуют результатам и выводам, полученным в диссертации. Автореферат написан грамотным научным языком.

Публикация основных результатов

Основные результаты диссертационной работы полно и своевременно опубликованы. По теме диссертации автором опубликовано 120 работ, в том числе 9 работ в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 25 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 28 работ в материалах конференций, индексируемых Web of Science и Scopus; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты исследования доложены и обсуждены на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях, в числе которых «Siberian Conference on Control and Communications» (SIBCON), «East-West Design & Test Symposium» (EWDTS), «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ), «Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency» (SUMMA), XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). Исследования по теме диссертации частично поддержаны грантами, включая грант в области информационной безопасности МТУСИ и Программу развития Научно-образовательного математического центра Приволжского федерального округа.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а именно пунктам: 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений» – в части предложенных моделей систем дробного порядка и методов их идентификации; 2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» – в части численно устойчивых

вычислительных схем на основе расширенной системы уравнений и неявной итерационной схемы регуляризации; 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» – в части разработанного программного комплекса.

Рекомендации по использованию полученных в работе результатов

Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию в научно-исследовательских организациях и высших учебных заведениях, специализирующихся в области идентификации систем, математического моделирования и обработки сигналов. Разработанные методы и программный комплекс применимы при решении практических задач параметрической идентификации в машиностроении, электроэнергетике и на предприятиях железнодорожного транспорта, в частности при диагностике рельсовых цепей, оценивании параметров тяговых электродвигателей и линий электропередачи по зашумлённым измерениям. Результаты работы также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по направлениям, связанным с математическим моделированием, вычислительными методами и теорией идентификации.

Замечания по диссертации

1. Доказательства сильной состоятельности проведены при нулевых начальных условиях. Автор корректно ослабляет условие до нулевых начальных условий в конечный момент времени N_0 , однако количественная связь между N_0 , эффективной «длиной памяти» дробных разностей и остаточным смещением оценок при конечных объёмах выборки в работе не исследована.

2. Методы на основе обобщённых полных наименьших квадратов опираются на априорное знание корреляционной матрицы возмущений либо отношений дисперсий помех. Анализ чувствительности получаемых оценок к неточному заданию этой априорной информации в диссертации не приводится, тогда как для практического применения он был бы полезен.

3. Единый подход на основе обобщённых полных наименьших квадратов заявлен для широкого класса нелинейных систем (Гаммерштейна, Винера, билинейных), однако в вычислительном эксперименте автореферата подробно проиллюстрирован преимущественно линейный случай; численную апробацию нелинейных моделей желательно расширить.

4. В тексте встречаются отдельные опечатки и погрешности в нумерации списка литературы.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение по диссертации

Диссертация Иванова Дмитрия Владимировича «Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным»

представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема – разработаны новые модели дискретных стохастических систем дробного порядка и вычислительно устойчивые методы их идентификации при неполных данных, имеющие существенное значение для математического моделирования и теории идентификации.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, обоснованности и достоверности полученных результатов работа соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а по форме и содержанию отвечает требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в редакции от 16.10.2024, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук.

Автор диссертации, Иванов Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен на основании заключения, принятого на заседании кафедры математического анализа ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» «31» августа 2026 г., протокол № 0502-01.

Декан математического факультета,
Зав. каф. математического анализа
д.ф.-м.н. доцент



М. Ш. Бурлуцкая

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет».

Адрес: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1.

Телефон: +7 (473) 220-75-21

Электронная почта: office@main.vsu.ru

Сайт: <https://www.vsu.ru>

