

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Иванова Дмитрия Владимировича

«Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа Иванова Дмитрия Владимировича посвящена вопросам создания, теоретического обоснования и практической реализации вычислительно устойчивых методов параметрической идентификации моделей дискретных стохастических систем дробного порядка по неполным данным.

Задача параметрической идентификации, непосредственно связанная с построением математических моделей динамических систем по экспериментальным данным, относится к числу основных проблем математического моделирования. Она заключается в определении неизвестных параметров моделей, принадлежащих определенному классу. В настоящее время особый интерес представляют модели дробного порядка, которые точнее описывают процессы, обладающие долговременной памятью. Как показано в первой главе диссертации, до настоящего времени для систем дробного порядка при наличии помех во входных и выходных сигналах были известны лишь методы на основе высших статистик, предполагающие значительные ограничения на сигналы и помехи.

Существенно, что зависимость значений дробных разностей от предыстории делает задачу оценивания плохо обусловленной, вследствие чего решения соответствующих систем уравнений оказываются чувствительными к ошибкам машинного округления. Поэтому наряду с точностью оценивания на первый план выходит вопрос вычислительной устойчивости алгоритмов идентификации, которому в диссертации уделено отдельное внимание. В связи с изложенным

выше, тема диссертации представляется актуальным направлением научных исследований.

Научная новизна результатов диссертации определена новизной подхода к построению моделей и вычислительно устойчивых алгоритмов параметрической идентификации дискретных динамических систем дробного порядка. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен единый класс моделей дискретных динамических систем дробного порядка, обобщающий два ранее существующих неэквивалентных подхода к их описанию на случай произвольного числа дробных разностей и запаздываний; впервые введены 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. Построен и теоретически обоснован метод на основе обобщенных полных наименьших квадратов, применимый 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. Доказана сильная состоятельность получаемых оценок параметров.

3. Разработан метод на основе обобщенных инструментальных переменных для случая неполной информации об автокорреляционных функциях помех, для которого также доказана сильная состоятельность оценок.

4. Впервые предложена расширенная система уравнений, эквивалентная смещенной нормальной системе уравнений, отличающаяся от известной расширенной комплекснозначной системы меньшей размерностью и отсутствием комплексных коэффициентов; получена аналитическая оценка ее спектрального числа обусловленности (Теорема 3.1).

5. Предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов, позволяющая заменить исходную задачу последовательностью задач, обусловленных лучше, чем задача обыкновенных

наименьших квадратов; получена оценка спектрального числа обусловленности построенной схемы (Теорема 3.2) и исследованы условия ее сходимости.

6. Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс, реализующий предложенные модели и методы идентификации и предназначенный для проведения вычислительных экспериментов.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа изложена на 271 странице и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 268 источников и двух приложений.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, объеме и структуре диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор существующих подходов к описанию дискретных динамических систем дробного порядка и методов их параметрической идентификации. Автором предложено обобщение двух известных неэквивалентных подходов на случай многих дробных разностей и запаздываний, впервые введена билинейная модель дробного порядка и комплекс моделей с новыми классами возмущений. Проведенный анализ показал, что для систем дробного порядка при помехах во входных и выходных сигналах известны лишь методы на основе высших статистик, что и определило постановку задачи: создание методов, совмещающих высокую точность оценивания с высокой численной устойчивостью и допускающих коррелированные помехи.

Во второй главе разработан и теоретически обоснован метод идентификации на основе обобщенных полных наименьших квадратов. Получены критерии оценивания для линейных ARX-моделей систем дробного порядка при наличии помех во входном и выходном сигналах и доказана сильная состоятельность оценок (Теоремы 2.1–2.4), в том числе для случаев априорно известной корреляционной матрицы возмущений, постоянных дисперсий помех, дробно-дифференцированного белого шума и FARARX-модели. Построены рекуррентные алгоритмы типа стохастической аппроксимации,

минимизирующие рассмотренные критерии, и доказана состоятельность получаемых с их помощью оценок (Теорема 2.5). Отдельно рассмотрены билинейные ARX-системы, системы классов Гаммерштейна и Винера, а также метод обобщенных инструментальных переменных при неполной информации о корреляционных функциях возмущений (Теоремы 2.6, 2.7). Следует отметить, что предложенный подход позволяет проводить идентификацию единым образом для моделей и классов помех, ранее не рассматривавшихся в литературе.

Третья глава посвящена проблемам вычислительной реализации предложенных методов и представляет наибольший интерес с точки зрения численных методов. Показано, что решение задачи полных наименьших квадратов на основе смещенной нормальной системы уравнений сопряжено со значительным ростом числа обусловленности, а решение на основе правого сингулярного вектора расширенной матрицы связано с вычислительными трудностями. В качестве альтернативы предложена расширенная эквивалентная нормальной смещенная система уравнений, не содержащая комплексных коэффициентов и имеющая меньшую размерность, чем известная комплекснозначная расширенная система; для нее получена аналитическая оценка спектрального числа обусловленности (Теорема 3.1), из которой следует преимущество предложенной системы при малом зазоре между наименьшими сингулярными числами. Далее предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов, число обусловленности которой на каждой итерации оказывается меньше числа обусловленности задачи наименьших квадратов и, следовательно, ниже теоретического предела, достижимого при регуляризации Тихонова (Теорема 3.2). Рассмотрены также случай априорно неизвестных порядков модели, для которого предложен итерационный метод с генетическим алгоритмом оценивания нелинейных коэффициентов, и случай авторегрессии дробного порядка при неизвестных дисперсии аддитивного шума и отношении сигнал–шум.

В четвертой главе приведено описание структуры программного комплекса, реализованного в виде скриптов на языке MATLAB, и результаты вычислительных экспериментов. Программный комплекс включает блоки

генерации исходных данных, идентификации параметров, обработки и визуализации результатов, что позволяет проводить серии статистических испытаний для различных отношений сигнал–шум. Результаты компьютерного моделирования подтверждают преимущество разработанных методов перед методом наименьших квадратов, а также преимущество предложенной расширенной системы уравнений перед смещенной нормальной системой для плохо обусловленных случаев.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Степень обоснованности и достоверность полученных результатов.

Положения диссертации представляются обоснованными как теоретически, так и в рамках проведенных вычислительных экспериментов. Теоретические результаты получены с применением методов теории вероятностей и теории оценивания, математической статистики, теории оптимизации и вычислительной линейной алгебры; доказана сильная состоятельность оценок для всех предложенных методов, включая рекуррентные. Оценки спектральных чисел обусловленности расширенной системы и неявной итерационной схемы получены аналитически и подтверждены численно. Содержание диссертации отражено в 120 публикациях, среди которых 9 работ в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, и 25 работ в изданиях, рекомендованных ВАК; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационного исследования докладывались на российских и зарубежных конференциях и семинарах. Автореферат корректно и в полной мере отражает содержание диссертации.

Практическая ценность результатов не вызывает сомнений. Она заключается в разработке вычислительно устойчивых алгоритмов параметрической идентификации моделей дробного порядка и создании реализующего их комплекса программ, применимых для решения практических задач в различных областях науки и техники – при оценивании параметров моделей электродвигателей, линий электропередачи, рельсовых цепей, технологического оборудования, а также в анализе временных рядов и

эконометрике. Приведенный в приложении пример идентификации модели нагрева экструдера полимеров по экспериментальным переходным характеристикам подтверждает применимость разработанных методов к реальным данным. Полученные результаты могут быть использованы также в учебном процессе при подготовке специалистов в области математического моделирования и численных методов.

Замечания по диссертации:

1. Основным средством повышения вычислительной устойчивости в работе выбран подход, основанный на переходе к расширенной эквивалентной системе уравнений. Вместе с тем для плохо обусловленных задач оценивания хорошо известны так называемые квадратно-корневые алгоритмы, основанные на различных методах факторизации матриц, определяющих нормальные уравнения, и работающие с матричными квадратными корнями. В диссертации не обсуждается, почему предпочтение отдано именно расширенной системе, и не проводится сравнение с алгоритмами такого типа, что является определенным пробелом в исследовании.

2. Оценки качества предложенных вычислительных схем даны исключительно в терминах спектрального числа обусловленности. Однако число обусловленности характеризует лишь верхнюю границу возможной потери точности; в работе отсутствует анализ обратной устойчивости (backward stability) предложенных схем и оценка фактической погрешности решения в терминах машинной точности.

3. Решение расширенной системы предполагает знание минимального сингулярного числа $\sigma = \sigma_{\min}(\Phi', Y')$, для нахождения которой требуется решать нелинейную скалярную задачу. Вычислительная стоимость этого этапа и влияние погрешности определения σ на точность получаемых оценок в диссертации не исследованы.

4. Рекуррентные алгоритмы, представленные в диссертации, построены как алгоритмы типа стохастической аппроксимации и для них доказана состоятельность оценок. Однако вопрос об их численной устойчивости – центральный для остальной части работы – не поднимается: не исследуется

накопление ошибок машинного округления при рекуррентном пересчете и не рассматриваются устойчивые (факторизованные) формы реализации рекуррентных схем.

5. Программный комплекс реализован в виде скриптов на языке MATLAB. В диссертации не приводится оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов и не обсуждаются вопросы их эффективной реализации при больших объемах выборки, тогда как для дробных разностей, требующих учета всей предыстории, эти вопросы существенны.

Указанные замечания не снижают научной значимости диссертации и не влияют на ее положительную оценку.

Общее заключение по диссертации. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, в котором автором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области математического моделирования и идентификации математических моделей динамических систем дробного порядка. Предложены новые модели дискретных стохастических систем дробного порядка, построены и строго обоснованы методы их идентификации при неполных данных, разработаны вычислительно устойчивые схемы реализации этих методов и создан реализующий их комплекс проблемно-ориентированных программ. Основные результаты диссертации полностью и своевременно опубликованы как в ведущих российских научных изданиях, рекомендованных ВАК, так и в авторитетных зарубежных журналах; работа прошла всестороннюю апробацию на всероссийских и международных конференциях. Полученные результаты являются новыми и актуальными и представляют интерес для специалистов, работающих в области математического моделирования, параметрического оценивания и идентификации стохастических систем.

Считаю, что диссертация «Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным» соответствует пунктам 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к

докторским диссертациям, а ее автор, Иванов Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный Цыганова Юлия Владимировна,
оппонент доктор физико-математических наук (05.13.18), доцент, профессор Центра образовательных программ топ-уровня в сфере искусственного интеллекта Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис»

420500, Россия, Республика Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1,
Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет
Иннополис», сайт: <https://innopolis.university/>, тел.: +7 (843) 203-92-53,
e-mail: y.tsyganova@innopolis.ru

Согласна на обработку персональных данных.

 Цыганова Юлия Владимировна

«19» августа 2026 г.



Подпись Иванов Д.В. заверяю
Руководитель отдела учета и движения
персонала АНО ВО «Университет Иннополис»
 Э.Р. Ахунова