

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертационную работу Дмитрия Владимировича **ИВАНОВА**
МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДРОБНОГО ПОРЯДКА ПО НЕПОЛНЫМ ДАННЫМ
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

На оппонирование представлена диссертационная работа объёмом 271 лист, из которых основной текст составляет 227 листов. Структурно работа организована в виде четырех глав, которым предшествует Введение, а после идут Заключение, Список литературы (268 наименований) и два Приложения.

Работа спланирована как последовательное решение ряда взаимосвязанных задач.

Цель работы сформулирована автором во Введении как создание, теоретическое обоснование и реализация новых моделей дискретных стохастических систем дробного порядка и вычислительно устойчивых методов их идентификации при неполных данных.

В первой главе диссертации (18 стр.) автором предложено обобщение двух известных неэквивалентных подходов к описанию дискретных динамических систем дробного порядка на случай многих дробных разностей и запаздываний, введена модель билинейной дискретной системы дробного порядка, а также ряд 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. Также дан обзор существующих методов параметрической идентификации, где показано, что для систем дробного порядка при помехах во входных и выходных сигналах на современном этапе применяются методы на основе высших статистик.

Во второй главе (61 стр.) разрабатывается и исследуется метод идентификации на основе обобщённых полных наименьших квадратов. Получены критерии оценивания для линейных ARX-моделей при помехах во входном и выходном сигналах, доказана сильная состоятельность оценок, включая случаи известной и постоянной дисперсии помех, дробно-дифференцированного белого шума и FARARX-модели. Рассмотрены билинейные, системы Гаммерштейна и Винера и метод обобщённых инструментальных переменных при неполной информации о корреляционных функциях помех. Разработаны рекуррентные

алгоритмы идентификации параметров моделей на основе стохастической аппроксимации.

В третьей главе (30 стр.) решаются вопросы вычислительной реализации предложенных методов. Представлена расширенная эквивалентная нормальная смещённая система без комплексных коэффициентов, направленная на уменьшение размерности спектрального числа. Предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов с оценкой числа обусловленности. Для ситуации неизвестных порядков на основе генетического алгоритма разработан итерационный подход. Для авторегрессии дробного порядка разработан метод идентификации при неизвестных отношении сигнал–шум и дисперсии аддитивного шума.

В четвёртой главе (103 стр.) приведено описание структуры программного комплекса, реализующего разработанные методы в виде скриптов на языке Matlab, а также результаты имитационного моделирования. Приведены оценки погрешностей оценивания параметров и моделирования для различных отношений «помеха–сигнал», подтверждающие преимущество разработанных методов над методом наименьших квадратов и преимущество расширенной системы над смещённой нормальной системой. Приводятся примеры применения разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения для идентификации параметров моделей асинхронного двигателя дробного порядка, гармонических и полигармонических сигналов и моделей трендов.

Актуальность темы. Задачи идентификации параметров динамических систем по зашумлённым и неполным измерениям возникают в различных технических приложениях, в частности, при диагностике электрических машин, идентификации линий электропередачи и рельсовых цепей, обработке сигналов, анализе временных рядов и во многих других. Многие реальные объекты адекватнее описываются уравнениями с производными и разностями дробного порядка, обладающими долговременной памятью. Однако для таких систем при помехах одновременно во входном и выходном сигналах до сих пор были известны лишь методы на основе высших статистик, накладывающие значительные ограничения на сигналы и помехи. Сильная зависимость от предыстории делает задачу оценивания плохо обусловленной, поэтому создание методов, совмещающих высокую точность оценивания с вычислительной устойчивостью, чему и посвящена диссертационная работа, является актуальной научной задачей.

Новыми научными положениями диссертации, представляющими наибольший интерес, являются:

- предложенный класс моделей дискретных динамических систем дробного порядка, обобщающий известные подходы на случай многих дробных разностей и запаздываний, включая впервые предложенную билинейную модель и модели с классами возмущений не исследовавшимися ранее;
- методы идентификации динамических систем дробного порядка:
 - на основе обобщённых полных наименьших квадратов, применимый к линейным и к ряду нелинейных (Гаммерштейна, Винера, билинейных) систем с доказанной сильной состоятельностью оценок;
 - на основе обобщённых инструментальных переменных для линейных систем дробного порядка при неполной информации об автокорреляционных функциях помех;
- расширенная эквивалентная нормальная смещённая система уравнений меньшей размерности и с меньшим числом обусловленности по сравнению с комплекснозначной расширенной системой, не содержащая комплексных коэффициентов;
- неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов, обладающая меньшим числом обусловленности чем регуляризация Тихонова;
- программный комплекс, реализующий разработанные модели и методы идентификации.

Обоснованность научных положений и выводов. Предложенные модели и методы имеют строгое теоретическое обоснование и не противоречат известным результатам других авторов. Достоверность подтверждается корректностью математических доказательств (в первую очередь доказательств сильной состоятельности оценок и аналитических оценок числа обусловленности) и результатами вычислительных экспериментов, проведённых с помощью разработанного программного обеспечения. Обоснованность полученных результатов подтверждается также апробацией на многочисленных всероссийских и международных конференциях и публикациями: по теме диссертации опубликовано 120 работ, в том числе 9 в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 25 в изданиях перечня ВАК, 28 в материалах конференций, индексируемых Web of Science и Scopus; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Значимость результатов диссертации для науки и практики. К результатам, имеющим теоретическую значимость, следует отнести предложенный единый подход к идентификации линейных и нелинейных моделей систем дробного порядка при наличии помех наблюдения, охватывающий в том числе нестационарные помехи, а также доказательство сильной состоятельности оценок для рекуррентных и нерекуррентных методов, базирующихся на этом подходе.

Практическая значимость состоит в том, что разработанные алгоритмы и созданное на их основе программное обеспечение применимы в различных технических приложениях (машиностроении, эконометрике, геофизике, системах передачи информации, автоматизированных системах управления и других). Судя по данным работы, применение предложенного метода идентификации линейных систем дробного порядка по сравнению с методом наименьших квадратов позволяет снизить среднюю погрешность оценивания параметров на 9 - 22 %, а рекуррентный алгоритм идентификации параметров моделей динамических систем дробного порядка – на 8–27 % по сравнению с рекуррентным методом наименьших квадратов. Переход к расширенной системе сокращает время решения в 1,5–1,8 раза по сравнению с комплекснозначной расширенной системой.

Считаю, что исследования по теме диссертации целесообразно продолжить и развивать.

Соответствие автореферата диссертации. Автореферат соответствует диссертации и в достаточной мере отражает результаты и выводы диссертационной работы.

Основные положения, выносимые на защиту, обсуждались на научных конференциях и семинарах и широко опубликованы в рецензируемых изданиях.

Мнение о работе в целом. В работе изложены новые решения по разработке моделей и методов идентификации динамических систем дробного порядка при неполных данных, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие теории идентификации. Обобщающая научная задача декомпозирована на шесть частных задач, каждая из которых решена. Результаты решения этих задач отражены в положениях, выносимых на защиту. Цель диссертационного исследования достигнута – предложены новые модели систем дробного порядка и созданы численно устойчивые методы их идентификации, доказана сильная состоятельность оценок, разработан программный комплекс.

В качестве недостатков, замечаний и пожеланий по работе следует отметить следующие.

1. Цель работы: «Создание новых моделей ...», сформулирована некорректно, цель работы связана с разработкой, теоретическим обоснованием и реализацией универсального подхода для идентификации параметров линейных и нелинейных моделей систем различных классов, описываемых уравнениями с разностями дробного порядка при наличии помех наблюдений. Методы, модели, алгоритмы – средства достижения цели.

2. Ограничения, при которых доказаны теоремы состоятельности включают предположения о статистической независимости как помех, так и входного сигнала от помех, но так ли это на практике проверить трудно. Хорошо бы исследовать последствия их нарушения для состоятельности и смещения оценок. Также, критерии на основе используемого автором обобщенного полного метода наименьших квадратов требуют априорного знания корреляционной матрицы возмущений либо отношений дисперсий помех. В приложениях эти параметры можно оценить только с погрешностью. Целесообразно было бы исследовать чувствительность метода к этим погрешностям.

3. В теореме 3.1 спектральное число обусловленности расширенной системы записано для двух случаев, различающихся условием для масштабного параметра σ . Как определить, какой из случаев имеет место быть на практике, по какому критерию выбирать масштабный параметр.

4. Для леммы 2.1 (стр. 38) утверждается, что можно показать, что математическое ожидание невязки ε_i , в линейной регрессии (2.2) равно нулю. При этом полного доказательства не приведено.

5. В таблицах 4.1 – 4.6 оценки приведены в форме «среднее $\pm$ СКО», но не указаны доверительная вероятность и доверительные интервалы результатов, что затрудняет оценку эффективности.

6. В работе отсутствует список обозначений и сокращений, что при ее анализе вызывает неудобства. Так, например, на стр. 22 не пояснены обозначения x и z и другие. Они расшифровываются только на стр. 27 с посредством рис. 1.6.

7. Не пояснено, почему и как автор при тестировании выбрал значения дробных порядков (например, 0,9; 1,7; 0,7 и т.д.), коэффициентов, объема выборки (в частности, 2000) и числа реализаций Монте-Карло (в частности, 50).

8. Термин «идентификация систем» — это устоявшийся термин, но применительно к математическим моделям, на мой взгляд, целесообразно

использовать «идентификация параметров моделей», а не «идентификация моделей».

9. Выражение (2.7) не должно тождественно соответствовать (2.8);

- для предложенной расширенной системы (3.9) нет выводов по области ее применимости в зависимости от числа ее обусловленности;

- формулировка замечаний 1 и 2 на стр. 83 требует уточнения;

- не пояснено, чем обусловлен резкое увеличение логарифма числа обусловленности предлагаемой расширенной системы на рис. 4.21.

10. Для рисунков 4.4, 4.5, 4.10, 4.11, 4.14 и 4.15 не пояснено какой цвет каким методам соответствует, приходится разбираться в этом дополнительно по контексту;

- результаты, приведенные на рис. 4.17, 4.22, 4.46 и 4.48 не пояснены в тексте диссертации;

- на рис. 3.4 у зависимостей отсутствуют номера.

- поиск по 8 ключевым словам (стр. 17) на самом деле по 9.

11. В автореферате в Заключение указано, что применение неявной итерационной схемы регуляризации уменьшает погрешность в среднем на 1,5–2,0 % по сравнению с регуляризацией Тихонова. Однако в автореферате отсутствуют сведения, по которым можно было бы сделать такой вывод.

12. Отмечу также, что в тексте диссертации и автореферата встречаются орфографические и пунктуационные небрежности.

Отмеченные замечания практически не влияют на значимость и достоверность теоретических и практических результатов диссертации, выносимых на защиту; часть из них можно отнести к пожеланиям по развитию результатов исследований. Анализ работы позволяет сделать вывод, что в диссертации Иванова Д. В. на основании выполненных исследований изложен комплекс новых научно обоснованных решений моделей и вычислительно устойчивых методов идентификации динамических систем дробного порядка при неполных данных, вносящих значительный вклад в развитие теории идентификации и математического моделирования.

Заключение. Диссертационная работа Иванова Дмитрия Владимировича «Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным» является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые теоретические положения по идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 –

Доктор технических наук (05.13.16),
профессор, директор НИЦ обработки
цифровых сигналов и изображений
«Сигнал» Ульяновского государственного
технического университета

« 14 » 09 2026 г.

Email: tag@ulstu.ru

Личную подпись А.Р. Хаммидов заверяю

Начальник управления кадрового обеспечения

Резел Буржасаев О.Ч.

