

ОТЗЫВ

официального оппонента Щербакова Павла Сергеевича на диссертацию Иванова Дмитрия Владимировича на тему: «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.

Общая характеристика работы

Диссертация Иванова Д.В. посвящена задаче параметрической идентификации дискретных динамических систем дробного порядка по неполным данным, под которыми в работе понимаются данные, искажённые возмущениями во входных и выходных сигналах. Тема лежит на пересечении теории оценивания, вычислительной линейной алгебры и разностных уравнений дробного порядка. Её актуальность обусловлена, с одной стороны, тем, что модели дробного порядка точнее описывают процессы с долговременной памятью, а с другой – тем, что для таких систем при помехах по всем переменным ранее были известны лишь методы на основе высших статистик, накладывающие значительные ограничения. Дополнительную трудность создаёт плохая обусловленность задачи, характерная для систем с сильной зависимостью от предыстории.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения общим объёмом 271 страница.

Глава 1 является обзорно-постановочной: в ней предложено обобщение двух известных подходов к описанию систем дробного порядка на случай многих дробных разностей и запаздываний, впервые введена билинейная модель и ряд моделей с новыми классами возмущений; на основе обзора обоснована постановка задачи.



Глава 2 – основная теоретическая глава. В ней построен метод идентификации на основе обобщённых полных наименьших квадратов, применимый единым образом к линейным и к некоторым классам нелинейных (Гаммерштейна, Винера, билинейных) систем при помехах различных классов – мартингал-разностей, белого шума, автокоррелированных и дробных шумов. Для получаемых оценок доказана сильная состоятельность (теоремы 2.1–2.7), в том числе для случая постоянной дисперсии помех, для FARARX-модели, для билинейных ARX-систем и для метода обобщённых инструментальных переменных при неполной информации о корреляционных функциях помех. Здесь же построены рекуррентные алгоритмы типа стохастической аппроксимации.

Глава 3 посвящена вычислительной реализации. Автору удалось предложить расширенную эквивалентную нормальную смещённую систему, которая, в отличие от известной комплекснозначной расширенной системы, имеет меньшую размерность и не содержит комплексных коэффициентов; её спектральное число обусловленности охарактеризовано теоремой 3.1. Далее предложена неявная итерационная схема регуляризации задачи полных наименьших квадратов, число обусловленности которой на каждой итерации меньше числа обусловленности задачи наименьших квадратов и, тем самым, ниже теоретического предела регуляризации Тихонова (теорема 3.2). Отдельно рассмотрены случай неизвестных порядков и случай авторегрессии дробного порядка при неизвестных отношении сигнал–шум и дисперсии аддитивного шума.

В главе 4 описан программный комплекс на языке MATLAB и приведены результаты имитационного моделирования, подтверждающие теоретические выводы. Заключение подводит итог работе и содержит количественные оценки эффекта: снижение погрешности оценивания параметров на 9–22 % и на 5–28 % относительно метода наименьших квадратов, на 8–27 % относительно рекуррентного метода наименьших квадратов, сокращение времени решения в 1,5–1,8 раза относительно комплекснозначной

расширенной системы и снижение погрешности на 1,5–2,0 % относительно регуляризации Тихонова.

Научная новизна и достоверность

Наиболее существенными новыми результатами я считаю единый метод обобщённых полных наименьших квадратов для широкого семейства линейных и нелинейных моделей дробного порядка с доказанной сильной состоятельностью оценок, а также построение расширенной системы и неявной итерационной схемы регуляризации с аналитическими оценками числа обусловленности. Первый результат заметно расширяет класс моделей, поддающихся состоятельному оцениванию; второй имеет самостоятельную ценность как приём повышения вычислительной устойчивости при решении плохо обусловленных задач полных наименьших квадратов.

Достоверность результатов обеспечена корректными математическими доказательствами и подтверждена вычислительными экспериментами. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты своевременно опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях.

Вопросы и замечания к диссертации

К диссертации имеется ряд вопросов и замечаний.

1) Условия теорем о состоятельности оценок названы «неограничительными», однако часть из них на практике трудно обеспечить: априорное знание корреляционной матрицы возмущений (или отношений дисперсий помех), статистическая независимость входного сигнала от помех, независимость помех в совокупности. Желательно иметь обсуждение того, насколько реалистичны эти предположения и как нарушение каждого из них сказывается на состоятельности и смещении оценок.

2) Все теоремы доказаны при нулевых начальных условиях. Автор корректно замечает, что для систем дробного порядка точная инициализация

требует знания всех значений на интервале $(-\infty, -1]$, и ослабляет условие до нулевых начальных условий в конечный момент $-N_0$. Однако связь между N_0 , эффективной длиной памяти дробных разностей и величиной остаточного смещения при конечной выборке в работе не исследована количественно, а именно этот вопрос критичен для практики.

3) Установлена сильная состоятельность оценок, но не приведены результаты об асимптотической нормальности и скорости сходимости оценок, необходимые для построения доверительных областей параметров.

4) Метод обобщённых инструментальных переменных использует конкретный выбор инструментов. Как выбор инструментальных переменных влияет на асимптотическую эффективность оценок и существует ли оптимальный в каком-либо смысле выбор?

Все замечания носят рекомендательный характер; они не снижают общего положительного впечатления от работы и не препятствуют присуждению степени доктора физико-математических наук.

Заключение

Диссертация Иванова Дмитрия Владимировича «Методы идентификации моделей динамических систем дробного порядка по неполным данным» представляет собой завершённое научное исследование, в котором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теории идентификации и математического моделирования. Полученные результаты являются новыми и актуальными и представляют интерес для специалистов, работающих в области параметрического оценивания и идентификации динамических систем.

Диссертация 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

Считаю, что 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.

Доктор физико-математических наук (05.13.01),
Главный научный сотрудник Лаборатории № 7
«Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина»
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН)

Мерв.

«25» августа 2026 г.

ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)»

Сайт: <https://www.ipu.ru/>

Телефон: +7(495)198-1720, доб. 1436

Email: cavour118@mail.ru

Подпись *Ивер*
ЗАВЕРЮ
ЗАВ. ОБЩИМ ОТДЕЛОМ
ЧУВХ И. П.

