

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Краева** Андрея Владимировича **«Свойства относительных порядков и их роль при решении обратных задач управления»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа А.В. Краева посвящена разработке, обоснованию, верификации и апробации алгоритмов и численных методов построения инвертора для линейных дискретных динамических систем. Инвертором в теории управления называют систему, которая по выходу линейного объекта позволяет найти неизвестное входное воздействие, т.е. решает задачу обращения. В современных цифровых системах управления инвертор по сути является численной схемой, вычисляющей (с заданной точностью) неизвестный входной сигнал системы. Особое место при этом занимают методы, работающие в режиме «on-line».

Понятие относительного порядка, введённое во второй половине XX века, существенно продвинуло исследования в области построения робастных алгоритмов наблюдения, стабилизации и обращения динамических систем. Это понятие дало возможность построить линейное невырожденное преобразование координат, приводящее систему к каноническому виду с выделением нулевой динамики, что, в свою очередь, позволяет получать простые, легко реализуемые алгоритмы управления динамическими системами. До настоящего времени вопрос о полном и исчерпывающем решении задачи обращения оставался открытым как в непрерывном, так и в дискретном случае. Были известны алгоритмы обращения, работающие в режиме реального времени или с незначительной задержкой для систем, обладающих относительным порядком.

Однако не все векторные системы удовлетворяют условиям из определения относительного порядка, причём такая ситуация имеет место в том числе и для систем, для которых задача обращения поставлена корректно. Краевым А.В. рассмотрена задача обращения линейной дискретной векторной системы. При этом одним из подходов, который позволил в итоге решить данную задачу, является сведение задачи для системы без относительного порядка к задаче для системы с относительным порядком. В результате исследования получены и обоснованы алгоритмы обращения для систем, не имеющих относительного порядка, работающие «on-line» или с небольшой задержкой. Проведено численное моделирование, подтвердившее правильность и высокую эффективность полученных

алгоритмов. Этим подтверждается актуальность работы и её научная новизна.

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы из 43 наименований. Работа содержит 9 иллюстраций.

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы, поясняются цели исследования, приводится обзор современных достижений в предметной области исследования, обосновывается научная новизна полученных результатов, перечислены методы исследования.

Первая глава посвящена исследованию корректности задачи обращения. Выделены классы систем, для которых задача обращения поставлена корректно, то есть имеет единственное (точное, финитное или асимптотическое) решение. Такие системы далее называются обратимыми. Сформулированы и доказаны утверждения о необходимых и достаточных условиях того, что задача обращения для линейной дискретной системы поставлена корректно.

Вторая глава посвящена описанию решения задачи обращения в случае скалярной системы. Этот случай рассмотрен отдельно, поскольку в этом случае относительный порядок существует всегда, и алгоритмы обращения, работающие на основе выделения нулевой динамики, применимы ко всем обратимым скалярным системам. Отдельно исследуется случай обращения по состоянию при наличии известной волновой модели неизвестного входного сигнала.

Третья глава содержит обобщение результатов второй главы на случай векторных систем. При этом, однако, приходится заметить, что векторный относительный порядок существует не всегда, поэтому приведённые алгоритмы обращения векторных систем иногда неприменимы. В работе исследованы свойства относительного порядка, его аналогов и обобщений, позволяющие свести задачу обращения для произвольной векторной дискретной системы к задаче для системы, обладающей относительным порядком. Одним из ключевых моментов является тот факт, что в некоторых случаях существует невырожденное линейное преобразование выходов системы, приводящее её к виду с относительным порядком. Вопрос о существовании и поиске такого преобразования до недавнего времени оставался открытым и был исчерпывающе решён в настоящей работе.

В четвёртой главе для поиска указанного преобразования выходов был доказан ряд свойств классического относительного порядка, на основе которых был предложен и обоснован алгоритм поиска. Данный алгоритм состоит в обходе графа конечного размера, зависящего от порядка системы. Алгоритм способен зафиксировать отрицательный результат поиска в случае, если искомое преобразование не существует. Доказанные свойства относительного порядка представляют самостоятельный теоретический

интерес, а предложенный алгоритм может быть использован в цифровых системах управления.

В пятой главе впервые введён в рассмотрение симметричный аналог относительного порядка, названный автором столбцовым. Рассмотрения, аналогичные классическому случаю, позволили получить алгоритм приведения систем со столбцовым относительным порядком к виду с выделением нулевой динамики, что решает задачу построения инвертора для этих систем. Тем не менее, оказалось, что существуют обратимые системы, не имеющие ни классического относительного порядка, ни столбцового.

В шестой главе автором введено в рассмотрение обобщение относительного порядка – главный неполный относительный порядок (ГНОП). Показано, что вектор ГНОП однозначно определён для всех систем, интересных с практической точки зрения, а для систем, имеющих классический относительный порядок, совпадает с ним. Показано, что для ответа на вопрос о приводимости системы к виду с относительным порядком линейным преобразованием выходов достаточно привести систему к виду с ГНОП и проверить условия определения относительного порядка. Приведён и обоснован эффективный алгоритм приведения системы к виду с ГНОП. Он является оптимизированным вариантом алгоритма обхода графа из главы 4 – оказалось, что при обходе графа проход по рёбрам связности достаточно делать только в одном направлении, без возвратов.

Поскольку рассмотренных линейных стационарных преобразований выхода оказалось недостаточно для решения задачи, в седьмой главе рассматривается возможность использовать дополнительные типы преобразования выходов, в частности, не являющиеся стационарными. Речь идёт о сдвигах компонент выхода по времени с соответствующей модификацией матрицы выходов. Предложена комбинация двух типов преобразований – линейного невырожденного и сдвига компонент выхода по времени – которая всегда приводит дискретную систему к виду с относительным порядком. Предложенный алгоритм строго обоснован, его эффективность подтверждена численным моделированием. Полученный результат исчерпывающим образом решает поставленную задачу.

Восьмая глава посвящена описанию примеров работы разработанных алгоритмов, их численному моделированию. Приведены результаты моделирования в виде графиков. Моделирование явилось завершающим этапом исследований, включавшим в себя теоретические изыскания, разработку, обоснование и верификацию алгоритмов, создание и апробацию программной реализации. На этапе моделирования можно отметить такие содержательные моменты, как решение проблемы «переполнения» при моделировании систем с неустойчивой матрицей состояний, что достигнуто при помощи дополнительного стабилизирующего звена.

В заключении кратко изложены основные результаты диссертационного исследования, его перспективы и возможности применения.

Основные результаты диссертационной работы А.В. Краева заключаются в следующем:

1. Исследованы свойства классического относительного порядка, дан алгоритмический ответ на вопрос о приводимости системы к виду с относительным порядком невырожденным линейным преобразованием выходов.

2. Впервые рассмотрен симметричный аналог классического относительного порядка – столбцовый относительный порядок. Для систем, обладающих столбцовым относительным порядком, предложены алгоритмы обращения на основе выделения нулевой динамики.

3. Впервые рассмотрено обобщение классического относительного порядка – главный неполный относительный порядок, что позволило дать ответ на ряд актуальных вопросов и представляет самостоятельный теоретический интерес. Предложен эффективный алгоритм поиска ГНОП.

4. Рассмотрен и обоснован алгоритм приведения системы к виду с относительным порядком на основе комбинации двух типов преобразований – линейного преобразования и сдвига по времени.

5. Все полученные результаты в совокупности позволяют реализовать универсальный эффективный программный комплекс для обращения линейных дискретных векторных систем, пригодный для всего класса обратимых систем.

Результаты работы получены в рамках строгих математических рассуждений, полностью теоретически обоснованы, прошли апробацию при моделировании и являются достоверными. Основные утверждения оформлены в виде лемм и теорем и корректно доказаны. Результаты исследования апробированы на нескольких международных и российских конференциях, докладывались на семинарах и опубликованы в 8 научных работах, 7 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Работа является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием, полностью решающим одну из актуальных задач современной математической теории, ранее считавшуюся нерешённой. Научная новизна полученных автором результатов не вызывает сомнений.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, содержание автореферата верно отражает основные положения диссертации.

Отметим следующие замечания, касающиеся оформления работы.

1. Вывод об отсутствии среди обратимых триад (A, B, C) систем, не являющихся слабоприводимыми, нигде не сформулирован в виде отдельного утверждения или следствия, и может быть получен лишь путём мысленного анализа всей совокупности утверждений и следствий главы 6.

2. Некоторые обозначения неудачны и вызывают путаницу. Например, понимание фразы " T_i – i -ая строка матрицы $T = T_1(T_2)^{-1}$ " вызывает затруднение.

3. Имеет место небольшое количество опечаток.

Данные замечания не меняет общую положительную оценку проделанной работы, задачи которой представляются выполненными. Автор работы убедительно продемонстрировал глубокое знание материала и способность проводить научно-исследовательскую работу. Так, введенное им понятие главного неполного относительного порядка инвариантно относительно преобразований выходов, тогда как классическое понятие относительного порядка не является инвариантным в векторном случае. Эта особенность нового понятия позволило автору реализовать универсальный эффективный программный комплекс для обращения линейных дискретных векторных систем.

Диссертационная работа Краева А.В. «Свойства относительных порядков и их роль при решении обратных задач управления» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвящённую актуальным задачам и выполненную на высоком научном уровне. На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа полностью отвечает специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, а её автор А.В. Краев заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
профессор кафедры математического
моделирования федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана»,
доктор физико-математических наук, доцент



В.Н. Четвериков

Тел. (499)2636391

E-mail: bauman@bmstu.ru

15.02.2016



ВЕРНО:
Зам. Начальника Управления кадров
МТУ им. Н.Э. Баумана

А.Г. МАТВЕЕВ