

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша Российской
академии наук, д.ф.-м.н., профессор



___ В. Ф. Тишкин

14 января 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность работы

Среди современных проблем математической теории управляемых процессов одно из важных мест занимают задачи обратной динамики. Задачи обращения в различных постановках многократно исследовались, начиная со второй половины XX века.

При рассмотрении задачи обращения системы, т.е. асимптотического восстановления неизвестного входа системы по текущей информации о ее измеряемом выходе, с практической точки зрения важна не столько теоретическая разрешимость задачи, сколько разработка практические реализуемых, надежных алгоритмов решения, т.к. расчётные алгоритмы могут быть положены в основу современных цифровых систем автоматического управления. Разработке таких алгоритмов, а также их верификации, и посвящена данная работа. При этом для расширения класса систем, для которых применимы разработанные алгоритмы обращения, приходится решать ряд задач, связанных со свойствами, со структурой изучаемых систем.

В линейном случае задача построения инвертора, т.е. вспомогательной системы, формирующей требуемую оценку неизвестного входа динамической системы, ставшая уже классической, тесно связана с исследованием свойств и канонических форм нулевой динамики. В прошедшие годы был накоплен обширный материал по отмеченным вопросам.

Однако основные полученные результаты в области канонических форм с выделением нулевой динамики были неразрывно связаны с классическим определением относительного порядка динамической системы, что накладывает определённые ограничения на область применимости известных алгоритмов обращения, поскольку определение относительного порядка выполняется не для всех векторных систем.

Таким образом, возникает задача обобщения теории построения инверторов на случай систем, не имеющих относительного порядка. Именно эта задача и рассмотрена в

предложенной диссертации. При этом основное внимание уделяется изучению свойств относительного порядка, а также построению его аналогов и обобщений, что в конечном итоге позволяет построить алгоритмы и численные методы, решающие задачу обращения для более широкого класса динамических систем, для которых эта задача была до сих пор нерешённой. Таким образом рассматриваемая работа является актуальной.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы, включающего 43 наименования.

Во введении даётся общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, приводится обзор литературы, формулируются цели исследования и выносимые на защиту положения, приводится список публикаций автора и апробаций работы.

Первая глава посвящена изучению свойств существования и единственности решения задачи обращения. Полученные условия формулируются в терминах устойчивости инвариантных нулей системы. При этом рассматривается три вида решения: точное, финитное и асимптотическое. Каждому случаю соответствует своя формулировка условия единственности.

Во второй главе подробно рассмотрена задача обращения скалярной системы и приведены алгоритмы её обращения, как по состоянию, так и по выходу. Подробно рассмотрен случай, когда неизвестный вход является выходом волновой модели. Приведены оценки ошибки определения входа по указанным алгоритмам в случае, если входные данные задаются с погрешностью. Особенностью постановки в скалярном случае является то, что относительный порядок определён для всех систем, удовлетворяющих условиям корректности.

В третьей главе приведены обобщения алгоритмов обращения в скалярном случае на случай векторных систем. Также как и в главе 2, рассмотрен случай волновой модели и приведены оценки ошибок в определении входа при неточно заданных данных. Особенностью векторного случая является то, что относительный порядок определён не для всех векторных систем. Поэтому предлагаемые в данной главе алгоритмы обращения по выходу, основанные на выделении нулевой динамики, применимы только к тем векторным системам, для которых выполнено определение относительного порядка.

Дальнейшее содержание работы посвящено задаче обобщения алгоритмов обращения дискретных динамических систем на случай векторных систем без относительного порядка. При этом делается попытка построить преобразования, сводящие задачу обращения для системы без относительного порядка к задаче для эквивалентной системы, обладающей относительным порядком.

Четвёртая глава посвящена изучению свойств относительного порядка. Целью этой главы является выяснение условий и методов приведения системы к виду с относительным порядком посредством невырожденного линейного преобразования выходов. Сформулированы и доказаны свойства относительного порядка, на основе которых предложен алгоритм поиска линейного невырожденного преобразования выходов

(приводящего систему к виду с относительным порядком) на основе обхода связного графа конечного размера.

В пятой главе подробно рассмотрен симметричный аналог классического относительного порядка – столбцовый относительный порядок. Получены алгоритмы обращения на основе выделения нулевой динамики для систем, обладающих столбцовым относительным порядком. Показано, что класс систем, не имеющих классического относительного порядка, но имеющих столбцовый – не пуст. Это позволяет утверждать, что рассмотрение столбцового относительного порядка расширяет класс систем, для которых удаётся построить инвертор на основе выделения нулевой динамики. Тем не менее, оказывается, что существуют системы, не имеющие ни классического, ни столбцового относительного порядка, и вопрос о построении инвертора для таких систем остаётся открытым.

В шестой главе приводится обобщение понятия относительного порядка – главный неполный относительный порядок. Это понятие однозначно определено для широкого класса систем (включающего все системы общего положения), и в случае системы с классическим относительным порядком совпадает с ним. Данное обобщение позволяет ответить на вопрос о приводимости системы без относительного порядка линейным невырожденным преобразованием выходов к виду с относительным порядком и позволяет предложить алгоритм такого приведения, показывающий, что аналогичный алгоритм, основанный на обходе графа из главы 4 можно оптимизировать – проход по рёбрам связности достаточно вести только в одном направлении.

В седьмой главе исследуется вопрос о дополнительных преобразованиях выходов, не являющихся линейными, которые можно предпринять для тех систем, которые не приводятся к виду с относительным порядком. В качестве таких преобразований в дискретном случае рассмотрен сдвиг компоненты выхода по времени с соответствующим преобразованием матрицы выходов. Показано, что комбинация линейных невырожденных преобразований выхода и сдвиг его компонент по времени, применяемые поочерёдно, по указанным в алгоритме правилам, всегда способны привести векторную линейную квадратную дискретную систему к виду с относительным порядком, что исчерпывающе решает задачу обращения для всего класса обратимых дискретных систем.

В восьмой главе приведены примеры и результаты моделирования. В процессе работы был создан программный комплекс в среде MATLAB, позволяющий провести численное моделирование по разработанным алгоритмам, их апробацию и верификацию. В процессе создания комплекса был решён ряд непростых технических задач, в частности, моделирование работы инвертора для системы с неустойчивой матрицей состояний. При этом ограниченность величин, получаемых при моделировании, обеспечивается включением в модель дополнительного стабилизирующего звена с соответствующим компенсатором. В тексте главы приведены описания расчетных задач и результаты работы программного комплекса в виде графиков. Результаты моделирования полностью подтверждают корректность и эффективность разработанных алгоритмов численного решения рассматриваемой задачи.

Научная новизна диссертации заключается в разработке новых алгоритмов для численного решения рассмотренной в диссертации задачи обращения дискретных динамических систем, в создании на их основе программного комплекса и проведении численного моделирования с применением созданного программного комплекса.

Достоверность результатов работы обеспечивается как их строгим теоретическим обоснованием, так и проведенными тестовыми расчетами и вычислительными экспериментами.

Практическая ценность диссертационной работы определяется возможностью использования разработанных алгоритмов и программного комплекса для решения широкого круга прикладных задач управления и моделирования динамических объектов и технических устройств, описываемых рассматриваемой математической моделью.

Результаты работы могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в МГУ им. М.В.Ломоносова, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ФИЦ ИУ РАН, МГТУ им. Н.Э.Баумана, а также в других научных и проектных организациях, занимающихся рассматриваемой тематикой.

Замечания по работе:

1. Результаты глав 4, 6 и 7 могут быть симметрично сформулированы и доказаны для случая систем со столбцовым относительным порядком, введенным в главе 5, и хотя автор упоминает об этом, но в содержание работы это не включено.

2. Несмотря на существенное продвижение и расширение класса систем, к которым применимы алгоритмы обращения, в непрерывном случае задача пока ещё не решена полностью.

3. Полученные алгоритмы обращения дискретных систем в самом сложном случае дают решение с ещё большим запаздыванием из-за того, что в преобразованной системе компоненты выхода дополнительно сдвигаются по времени. Это затрудняет их использование в реальных системах управления.

Однако отмеченные недостатки не снижают общей ценности рассматриваемой работы.

Диссертационная работа Краева А.В. представляет собой законченное, самостоятельно выполненное научное исследование, совокупность результатов которого можно квалифицировать как решение актуальной задачи теории управления динамических систем, имеющей важное значение для практики.

Автореферат в достаточной степени отражает основные положения диссертации. Результаты исследования достаточно полно опубликованы в журналах из перечня ВАК.

По объему и значимости полученных результатов диссертация Краева Андрея Владимировича соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемых к работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара отдела 15 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Протокол № 1 от 14 января 2016 г.).

Доктор физ.-мат. наук _____ Змитренко Николай Васильевич

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, отдел 15

Должность: Заведующий сектором

Тел.: +7 499-250-78-45

Адрес электронной почты: zmitrenko@imamod.ru

Почтовый адрес: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

Web-сайт организации: <http://keldysh.ru/>

Доктор физ.-мат. наук, _____ Криксин Юрий Анатольевич

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, отдел 15

Должность: Ведущий научный сотрудник

Тел.: +7 499-791-28-22

Адрес электронной почты: kriksin@imamod.ru

Почтовый адрес: 125047, Москва, Миусская пл., д. 4, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

Web-сайт организации: <http://keldysh.ru/>