

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Хартовского Вадима Евгеньевича

«Управляемость линейных динамических систем с последствием: качественный анализ и построение регуляторов»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление

Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите, со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК

Диссертация В. Е. Хартовского «Управляемость линейных динамических систем с последствием: качественный анализ и построение регуляторов» представляет собой концептуальное развитие теории проектирования регуляторов для линейных систем с последствием. Исследование относится к физико-математическим наукам, направлению математической науки. Предмет исследования диссертации: функционально-дифференциальные уравнения и задачи управления этими уравнениями. Область исследований: функционально-дифференциальные уравнения и методы регулирования динамическими системами. Таким образом, диссертация соответствует паспорту специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

Актуальность темы диссертации

В настоящее время все больший интерес у исследователей вызывают процессы и системы, математическими моделями которых являются уравнения с последствием. Наличие запаздывания достаточно серьезно усложняет процесс изучения таких уравнений. Это связано с тем, что в автоматической управляемой системе запаздывание может вызвать появление самовозбуждающихся колебаний, увеличение времени регулирования и явления свойства неустойчивости. Например, причиной неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях является наличие запаздывания, в качестве которого выступает время, необходимое для превращения топливной смеси в продукты сгорания. Наличие запаздывания существенно влияет на ход реального процесса и его игнорирование в ходе математического моделирования может привести к неадекватному описанию исследуемой модели.

При изучении реальных систем с последствием в качестве исходного приближения часто предполагается, что система автономна, а время последствия постоянно. В ряде случаев использование автономных систем достаточно хорошо отражает действительные явления. Например,

когда запаздывание связано с передачей звукового сигнала, с гидравлическим ударом или другим волновым процессом. Однако, несмотря на достаточно большое количество работ, связанных с исследованием таких систем, на сегодняшний день не существует разработанной в достаточной мере теории управления, позволяющей решать необходимый круг задач, возникающих в приложениях. Большинство законченных результатов относится к системам запаздывающего типа и не допускают дальнейшего обобщения на более сложные объекты, например системы нейтрального типа или дифференциально-алгебраические системы с запаздыванием. Последнее обстоятельство сдерживает использование современных компьютерных технологий при создании и анализе систем управления физическими, социально-экономическими, биологическими и др. объектами.

Диссертация В.Е. Хартовского посвящена исследованию проблем управляемости линейных стационарных дифференциальных систем с запаздываниями нейтрального типа, изучению которых посвящено огромное число научных статей и монографий. Например, в списке публикаций, недавно опубликованном И.К. Асмыковичем, посвященных дескрипторным системам, которые изучаются в пятой главе диссертации, содержится более 3500 наименований. Значительный вклад в исследование проблем управляемости линейных систем принадлежит белорусским математикам. Представленная диссертация уже четвертая докторская диссертация, написанная белорусскими математиками, начиная с семидесятых годов прошлого века и посвященных исследованию полной управляемости линейных систем с запаздыванием. Предыдущие три написаны профессорами, докторами физико-математических наук В.М. Марченко, С.А. Минюком и А.В. Метельским. Отметим также работы белорусских математиков В.В. Карпука, В.В. Крахотко, Г.П. Размысловича, И.К. Асмыковича и других, непосредственно примыкающих к результатам диссертационной работы В.Е. Хартовского. Задача полной управляемости систем с запаздываниями была поставлена в конце шестидесятых годов Н.Н. Красовским. В Беларуси, начиная с начала семидесятых годов двадцатого века, исследование проблем управляемости динамических систем ведутся под руководством чл.-корр. НАН Беларуси Ф.М. Кирилловой и профессора Р.Ф. Габасова.

Выше сказанное говорит о том, что тема и результаты диссертационного исследования, нацеленного на линейные автономные системы нейтрального типа и дифференциально-алгебраические системы с последствием, актуальна, в том числе для Республики Беларусь, идущей по пути развития наукоемких производств.

Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту

В первой главе диссертации дан подробный обзор литературы по теме диссертации.

Во второй главе исследуется проблема 0-управляемости для дифференциально-разностных систем с запаздываниями нейтрального типа. Задачи полной 0-управляемости и 0-управляемости совпадают для систем без запаздывания в управлении, но отличаются, если имеются запаздывания в управлении. Получен критерий 0-управляемости и критерий финальной наблюдаемости и установлена двойственность этих задач. При доказательстве указанных результатов проведено полное исследование линейных однородных разностных систем с произвольными матрицами. Эти результаты представляют и самостоятельный интерес для теории разностных систем.

В третьей главе изучается проблема приведения систем дифференциально-разностных уравнений с запаздываниями нейтрального типа к системам с конечным спектром или к системам с заданным характеристическим квазиполиномом с помощью регуляторов в форме динамической обратной связи. Получены критерии такой приводимости, причем в случае, когда условия критериев не выполняются, получены критерии слабой спектральной приводимости и слабой модальной приводимости. Получены необходимые и достаточные условия успокоения решений с помощью указанных регуляторов и предложены методы построения этих регуляторов.

В четвертой главе строятся финитные и асимптотические наблюдатели для дифференциально-разностных систем с запаздыванием нейтрального типа. Наблюдатели финитного типа позволяют за конечное время восстановить точное решение исходной системы. Они построены с использованием очень тонких свойств систем, таких как вырожденность систем с запаздыванием.

В пятой главе исследуются вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы с запаздыванием. Это системы, у которых некоторые уравнения являются дифференциальными, а остальные алгебраические. Получены: 1) критерии полной 0-управляемости и финальной наблюдаемости, 0-управляемости; 2) критерий существования регулятора успокоения в определенных классах регуляторов; 3) критерий спектральной приводимости и критерий слабой спектральной приводимости; 4) критерии модальной управляемости и критерий слабой модальной управляемости.

В ходе проведения диссертационного исследования В.Е. Хартовским разработана оригинальная теория построения регуляторов для динамических систем с последствием, в которой исследованы ранее неизвестные структурные свойства этих систем, получены принципиально

новые методы решения и условия разрешимости актуальных задач теории управления. Оригинальность предложенных в диссертации подходов прежде всего базируется на предложенной автором идеи замыкания исследуемого объекта тремя последовательно соединенными контурами регулятора. Первый контур компенсирует отклонение поведения исследуемой системы от решения некоторой эталонной системы, второй контур обеспечивает апериодическое управление скачками производных решения, а третий реализует цель управления. Универсальность такого подхода подчеркивается возможностями его модификации на задачи наблюдения, а также распространения на более сложные объекты. В диссертации это демонстрируется на решении задач проектирования новых типов наблюдателей и последующем обобщении развитого подхода к проектированию регуляторов на дифференциально-алгебраические системы.

Все научные положения, выносимые на защиту, являются новыми, оригинальными и имеют важное значения для теории управления динамическими системами.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Результаты научных исследований, представленных в диссертации, а также выводы и рекомендации являются достоверными, поскольку обосновываются строгими математическими доказательствами и согласуются с ранее установленными результатами других авторов. Существенных ошибок и пробелов не обнаружено. Достоверность результатов также подтверждается их публикацией в известных рецензируемых научных журналах.

Научная, практическая, экономическая и социальная значимость научных результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Результаты диссертационного исследования следует использовать при анализе динамических характеристик линейных автономных систем с последствием и конструирования регуляторов в объектах, моделируемых такими системами. Они применимы при моделировании поведения работы генераторов с запаздывающей обратной связью, процессов врезного шлифования, систем автоматического регулирования вентилятора главного проветривания шахт, работы ядерных реакторов, описываемых системами с запаздыванием, а также других процессов и объектов экономической, физической и биологической природы. Кроме того, результаты диссертации следует использовать при моделировании объектов волновой природы, описываемых системами с распределенными параметрами, путем сведения их к системам нейтрального типа. При этом использование новых

структурных свойств, изученных в диссертации и определенных как 0-управляемость, слабая спектральная приводимость и слабая модальная управляемость, и новых типов асимптотических наблюдателей представляет собой потенциальную возможность снизить затраты при формировании устройств управления и наблюдения за счет ослабления структурных требований к системе.

Результаты диссертации следует также положить в основу спецкурсов, читаемых для студентов физико-математических и инженерных специальностей. Некоторые результаты диссертации уже внедрены в учебный процесс, что подтверждено двумя актами внедрения.

Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Материал диссертационного исследования опубликован в 86 научных работах: 1 монографии, 25 статьях в научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь и в зарубежных научных журналах, 7 статьях в других научных изданиях, 28 публикациях в сборниках материалов научных конференций; 25 тезисах докладов. Отметим достаточно высокий уровень статей, в которых опубликованы результаты диссертации. Большинство из них индексируются в базах данных WoS, Scopus. Известность результатов соискателя в научных кругах подтверждается индексом Хирша в базе данных Scopus, равным 8.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь, предъявляемыми к оформлению диссертаций. Диссертация состоит из двух томов: первый том – основной материал диссертации, второй – приложения. Каждый из томов содержит более двухсот страниц. Такое изложение результатов для данной диссертации выглядит естественным. Например, во второй главе получен критерий 0-управляемости линейных систем с запаздыванием нейтрального типа, но невозможно доказать этот критерий не доказав близкий критерий полной 0-управляемости, полученный ранее другими авторами. Доказательство этого критерия и других таких же результатов перенесены в приложения. Достоинством диссертации является большое количество иллюстративных примеров, что свидетельствует о конструктивности и законченности полученных результатов. Большая часть примеров также отнесена в приложения.

Замечания по диссертации

Диссертация написана достаточно грамотно и аккуратно с небольшим количеством опечаток, которые перечислены ниже.

Отметим недостатки работы.

В диссертации используется отличное от общепринятого определение кусочно-непрерывной на интервале функции, поэтому необходимо сформулировать это определение.

На странице 5 в 5 строке снизу в списке обозначений (стр. 11 автореферата) введено множество, состоящее из дифференцируемых функций, имеющих кусочно-непрерывную производную. Это множество совпадает с множеством непрерывно дифференцируемых функций, что не соответствует тому множеству функций, которое используются в диссертации на стр. 113-114 приложений.

На странице 165 в определении 5.1 решения системы (5.1) и на странице 6 приложений в определении решения условие непрерывности решения недостаточно для обеспечения единственности. Кроме того, на стр. 6 приложений в определении решения имеется описка в записи промежутка, на котором решение непрерывно.

На странице 27 приложений в формуле (A.64) при характеристике функции V следовало бы просто написать «функция V такова, что она обеспечивает непрерывность интеграла, стоящего в правой части равенства (A.64)». Требование же кусочной непрерывности функции V излишне, поскольку с одной стороны требует дополнительных пояснений, а с другой далее нигде в диссертации не используется.

На странице 11 приложений нельзя считать, что уравнение (A.15) подробная запись предыдущего уравнения. Уравнение (A.15) скалярное, а предыдущее уравнение векторное.

Следует уточнить постановки задач 3.1; 3.2; 3.3; 3.4 (задачи 1-4 автореферата). После замыкания системы, указанной в диссертации обратной связью, получаем систему той же размерности, что и исходная система, и не понятно откуда в этих задачах появляется система более высокой размерности.

Необходимо уточнить определение наблюдателя и ошибки оценивания на стр. 115 (стр. 18 автореферата). Наблюдатель и исходная система -- дифференциальные системы. Они имеют бесчисленное множество решений и не понятно, что такое в этом определении разность решений.

На странице 14 приложений введено подпространство P^0 . Для определения этого подпространства используется параметр t_1 , следовательно, это подпространство зависит от t_1 . Далее при доказательстве леммы A.2 показывается, что базис этого подпространства один и тот же при всех достаточно больших t_1 . Следовательно, подпространство P^0 одно и тоже при всех достаточно больших t_1 . В диссертации же сразу считается, что P^0 не зависит от t_1 .

В следствии A.1 два разных объекта обозначены одной буквой.

В диссертации имеется большое число иллюстративных примеров. Но нет исследования ни одной модели реального процесса. Следовало бы привести такой пример.

Список замеченных опечаток. Стр. 5 автореферата пропущен предлог «с», стр. 8, 16 строка вместо уравнения надо написать уравнениям, стр. 11 вместо нету надо - нет, стр.12, 3 строка снизу вместо которой надо - которых, стр.14, 16 строка вместо имеет надо - имеет, вместо типа надо - тип, стр. 48 вместо aftereffect можно использовать - time delay. Страница 28 диссертации вместо Асмыкович надо – Асмыковича, страница 58, 20 строка вместо $+\infty$ надо - 0, страница 80, строка 13 вместо $f(t)$ надо - $u(t)$, 20 строка вместо x_1 надо - x , страница 115, 20 строка пропущена запятая, страница 125, 8 строка снизу вместо следующем надо – предыдущем. Страница 26 приложений, 3 строка снизу вместо подставляя найденное решение в граничные условия надо – подставляя граничные условия в найденное решение, на страницах 167-168 отсутствуют графики с точками. После уточнения понятия решения системы (5.1) надо несколько изменить доказательство утверждения 5.1.

Перечисленные замечания не влияют на достоверность полученных результатов.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Представленная диссертация и многочисленные обсуждения ее содержания с соискателем свидетельствуют о том, что автор диссертации В.Е. Хартовский обладает научной квалификацией и широтой знаний достаточными для присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление).

Вывод

Диссертационная работа Хартовского Вадима Евгеньевича соответствует требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Считаю возможным присудить В.Е. Хартовскому ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление за:

– критерии 0-управляемости и критерии существования регуляторов успокоения решений, а также методы построения как программных управлений, обеспечивающих успокоение решений, так и регуляторов успокоения решений для линейных автономных систем нейтрального типа и линейных стационарных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями;

– критерии разрешимости задач спектральной приводимости и слабой спектральной приводимости и методы построения регуляторов, приводящих линейные автономные дифференциально-разностные системы нейтрального типа и линейные автономные вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы к системам с конечным спектром;

– необходимые и достаточные условия разрешимости задач модальной управляемости и слабой модальной управляемости в классах интегральных и дифференциально-разностных регуляторов, а также способы построения регуляторов указанных типов для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем;

– условия существования и способы построения асимптотических наблюдателей и методы нахождения асимптотических оценок решений линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа;

– критерии существования и методы построения двух типов финитных наблюдателей в виде систем запаздывающего типа, во-первых наблюдателей, имеющих конечный наперед заданный спектр; во-вторых наблюдателей, имеющих сосредоточенные соизмеримые запаздывания и некоторый конечный спектр.

Перечисленные результаты представляют собой концептуальное развитие теории проектирования регуляторов для систем с последействием. Они являются принципиально новыми, а их совокупность является крупным достижением в теории управления динамическими системами.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

профессор,

профессор кафедры высшей математики

Белорусского государственного университета



А.А. Леваков

