

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

Диссертационная работа В.Е. Хартовского направлена на разработку нового подхода к решению проблемы проектирования регуляторов для систем с запаздыванием. Развитие такой теории имеет большое значение для решения задач автоматического управления, поскольку представленные в диссертации методы применимы к системам, используемым для моделирования широкого круга объектов и процессов.

В первой главе диссертации представлен достаточно подробный обзор литературы по выбранной тематике исследования, очерчены проблемы и нерешенные задачи, отмечена роль результатов автора в общем становлении соответствующей теории.

Главы 2-4 представляют собой новую теорию проектирования регуляторов для линейных систем нейтрального типа, содержащую в себе способы формирования управлений типа обратной связи и методы оценки решения для формирования этих управлений.

Во второй главе находятся условия 0-управляемости для линейных автономных систем дифференциальных уравнений нейтрального типа с соизмеримыми запаздываниями. Важное значение имеют исследования двойственных задач полной 0-управляемости и финальной наблюдаемости. В теореме 2.7 получены необходимые и достаточные условия полной 0-управляемости для дифференцируемых решений линейных автономных систем дифференциальных уравнений нейтрального типа с соизмеримыми запаздываниями, а для не дифференцируемых решений этих уравнений аналогичные условия приведены в теореме 2.12. Показано, что отказ от требования дифференцируемости решений приводит к более жестким условиям полной 0-управляемости. В теореме 2.10 получены необходимые и достаточные условия 0-управляемости для дифференцируемых решений дифференциальных уравнений нейтрального типа, а в теореме 2.14 --- необходимые и достаточные условия 0-управляемости для не дифференцируемых решений этих уравнений. Они сложнее по сравнению с аналогичными условиями полной 0-управляемости. Полученные теоретические результаты иллюстрируются не тривиальными примерами, приведенными в приложении Г.

Основные результаты диссертации изложены в третьей главе, посвященной важной проблеме проектирования регуляторов. В разделе 3.2 ставится задача замкнуть систему

$$(I_n - D(\lambda_h))\dot{x}(t) = A(\lambda_h)x(t) + B(\lambda_h)u(t), \quad t > 0, \quad (1)$$

линейной обратной связью $u = u(x, \dot{x})$ так, чтобы переменная x стала векторной компонентой решения некоторой линейной автономной системы дифференциальных уравнений нейтрального типа с соизмеримыми запаздываниями и конечным спектром. Рассмотрены два класса регуляторов: дифференциально-разностные и гибридные дифференциально-разностные. Существование дифференциально-разностных регуляторов связано со свойством спектральной приводимости системы (1), а существование гибридных дифференциально-разностных регуляторов --- со свойством слабой спектральной приводимости этой системы. Получены необходимые и достаточные условия спектральной приводимости и слабой спектральной приводимости системы (1). В разделе 3.3 ставится

задача замкнуть систему (1) линейной обратной связью $u = u(x, \dot{x})$ так, чтобы переменная x стала векторной компонентой решения некоторой линейной автономной системы дифференциальных уравнений нейтрального типа с заданным характеристическим квазиполиномом. Рассмотрены два класса регуляторов: интегро-дифференциально-разностные и гибридные интегро-дифференциально-разностные. Существование интегро-дифференциально-разностных регуляторов связано с модальной управляемостью системы (1), а существование гибридных интегро-дифференциально-разностных регуляторов --- со слабой модальной управляемостью этой системы. Получены необходимые и достаточные условия модальной управляемости и слабой модальной управляемости системы (1). При построении регуляторов допускаются изменения структуры управляемой системы и введение новых управлений. Эти допущения позволяют расширить возможности проектирования регуляторов при нахождении описывающих их аналитических зависимостей.

Четвертая глава диссертации посвящена проектированию наблюдателей для линейной автономной системы дифференциальных уравнений нейтрального типа (1) с наблюдаемым выходным сигналом

$$y(t) = C(\lambda_h)x(t), \quad t \geq 0. \quad (2)$$

В разделе 4.1 асимптотические наблюдатели строятся на базе решения задач модальной управляемости и слабой модальной управляемости. В теореме 4.1 описывается процедура построения наблюдателя при выполнении условий финальной наблюдаемости. Наблюдатель задается системой дифференциальных уравнений, решение которой дает оценку решения системы (1). При нарушении условий финальной наблюдаемости наблюдатель задается системой дифференциально-алгебраических уравнений. Процедура его построения описана в теореме 4.2. В разделе 4.2 решается задача точного восстановления решения системы (1) по результатам наблюдаемого выхода (2). Показано, что для существования финитного наблюдателя необходимо и достаточно, чтобы система (1), (2) была финально наблюдаема. В разделе 4.3 описана процедура асимптотической оценки решения асимптотически наблюдаемой системы. В разделе 4.4 для финально наблюдаемой системы предложен наблюдатель, который определяет точную оценку неизвестного решения системы (1).

В главе 5 диссертационной работы обобщаются развитые в предыдущих главах методы управления системами нейтрального типа на линейные вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы с запаздыванием

$$\frac{d}{dt}(Dx(t)) = A(\lambda_h)x(t) + B(\lambda_h)u(t), \quad t > 0. \quad (3)$$

Получены условия 0-управляемости и полной 0-управляемости системы (3). Построены классы регуляторов, в которых система (3) спектрально приводима, слабо спектрально приводима, модально управляема и слабо модально управляема.

Предмет исследования в диссертации – структурные свойства динамических систем с последствием, область исследования – развитие теории управления системами с последствием.

Таким образом, содержание диссертации соответствует специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

Актуальность темы диссертации

Многие реальные процессы в природе и технике имеют последствие, т. е. их поведение определяется состоянием или скоростью его изменения не только в текущий момент времени, но и в предшествующие. Такая ситуация возможна, например, когда

между моментом нарушения равновесия, то есть входным воздействием и началом изменения выходной величины, проходит некоторое время. В данном случае речь идет о так называемом транспортном запаздывании. Примерами могут служить динамические системы, управляемые на значительном расстоянии. В ряде случаев запаздывание является принципиальным свойством объекта, что требует его учета при анализе динамических характеристик. Объекты с запаздыванием являются наиболее трудными с точки зрения управления.

К основополагающим работам в области современной теории систем с запаздыванием, а также задачам управления и устойчивости можно отнести исследования Н. Н. Красовского, Р. Габасова, Ф. М. Кирилловой, Дж. Хейла, С. Н. Шиманова, Н. В. Азбелева, В. П. Максимова, Л. Ф. Рахматуллиной, Р. Белмана, К. Л. Кука, А. Д. Мышкиса и других ученых. Однако, невзирая на достаточно большое количество работ в этом направлении, многие вопросы остаются открытыми.

Одной из важнейших проблем является задача построения регуляторов, исследование которой имеет важное значение для теории автоматического управления. Представленная к оппонированию диссертация направлена на формирование теории построения регуляторов для линейных динамических систем с запаздыванием, включающая в себя методы построения управлений в виде обратной связи и подходы к проектированию наблюдателей, позволяющие получать как асимптотические, так и точные оценки решения. Результаты диссертационной работы сформулированы для систем нейтрального типа и дифференциально-алгебраических систем с последействием. Поэтому актуальность темы диссертационной работы В. Е. Хартовского не вызывает сомнений.

Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту

Диссертация В.Е. Хартовского посвящена трудной проблеме разработки теории управления для динамических систем с последействием нейтрального типа. Она содержит оригинальный подход к решению проблемы конструктивного построения регуляторов для линейных динамических систем с последействием, представляющий собой концептуальное развитие теории управления. В основе результатов В.Е. Хартовского лежит идея проектирования новых так называемых гибридных типов регуляторов. Для построения этих регуляторов соискатель провел полное исследование линейных автономных дескрипторных систем с дискретным временем, результатом которого стали новые методы построения множества допустимых начальных состояний и описания всех решений этих систем в зависимости от их асимптотических свойств.

На базе идеи использования гибридных регуляторов для линейных автономных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с последействием В.Е. Хартовским решены как классические задачи успокоения решения, спектральной приводимости, модальной управляемости, так и новые задачи, к которым относятся задачи 0 -управляемости, слабой спектральной приводимости, слабой модальной управляемости. Для линейных автономных систем нейтрального типа предложена техника проектирования наблюдателей, основанная на разработанных автором схемах синтеза регуляторов. Используя эти результаты, в диссертации построены асимптотические наблюдатели не только классического типа, но и наблюдатели нового типа, определяемые автором как асимптотические наблюдатели с ограниченной ошибкой, а также впервые для систем нейтрального типа построены финитные наблюдатели.

В диссертации приведены критерии разрешимости задач полной 0 -управляемости, 0 -управляемости, спектральной приводимости, слабой спектральной приводимости; критерии и условия модальной управляемости и слабой модальной управляемости; условия существования асимптотических и финитных наблюдателей, условия существования асимптотических наблюдателей с ограниченной ошибкой, условия реализуемости

предложенной автором процедуры формирования асимптотической оценки. Эти критерии и условия, представленные в виде соответствующих теорем и лемм, являются новыми.

Таким образом, результаты исследований В.Е. Хартовского, изложенные в виде диссертации «Управляемость линейных динамических систем с последействием: 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, являются принципиально новыми, представляют научный интерес и имеют большое значение для дальнейшего развития теории управления.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В.Е. Хартовский свободно использует в своих исследованиях разнообразные методы теории управления динамическими системами. При этом он демонстрирует свою высокую математическую квалификацию. Большой объем текста диссертации обусловлен стремлением подробного исследования задач, рассматриваемых в работе. Рассматриваются различные возможные варианты решения задач управления. Основные результаты диссертации сформулированы в виде теорем и лемм, их достоверность основана на строгих математических доказательствах и проиллюстрирована примерами. Результаты диссертации согласуются с общей теорией управления и известными результатами других ученых. Поэтому достоверность выводов и обоснованность рекомендаций не вызывает сомнений.

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

Результаты диссертационной работы представляют собой концептуальное развитие теории управления динамическими системами с последействием и позволяют решать ряд важнейших задач управления и наблюдения при моделировании процессов и объектов реального мира. Полученные схемы проектирования регуляторов и наблюдателей следует применять при разработке систем автоматического регулирования, учитывающих транспортное запаздывание, обусловленное временем транспортировки моделируемого объекта, проектировании длинных электрических линий без потерь, моделировании процессов в длинных трубопроводах, теплообменниках, а также для упрощения описания объектов управления с распределенными параметрами. При этом выявленные новые структурные свойства систем управления и использование новых типов наблюдателей позволяют сократить требования к органам управления и наблюдения по сравнению с существующими, что при их конструировании может положительно отразиться на себестоимости. Результаты диссертации следует использовать для написания магистерских и кандидатских диссертаций, при чтении спецкурсов для студентов ВУЗов инженерных и математических профилей.

Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 86 научных работах, из которых 1 монография, 25 статей 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 статей в других научных изданиях, 28 статей в сборниках материалов научных конференций; 25 тезисов докладов. Следует отметить, что 18 статей В.Е. Хартовского опубликованы в таких ведущих журналах Российской Федерации в области дифференциальных уравнений и управления, как Автоматика и телемеханика. Известия РАН. Теория и Системы управления, Дифференциальные уравнения, переиздаваемых под названиями Automation and Remote Control, Journal of Computer and Systems Sciences International, Differential equation.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь, которые предъявляются к оформлению диссертации и автореферата.

Замечания по диссертации

1. В формуле (2.3) второй главы не указана размерность наблюдаемого выхода.
2. Что можно сказать об 0-управляемости линейной автономной дифференциально-разностной системы нейтрального типа с несоизмеримыми запаздываниями близкими к соизмеримым?
3. Не указано множество изменения параметра λ для равенства (2.72) в теореме 2.12.
4. При описании системы (5.46), в примере к разделу 5.2 для приложения Л, не указан аргумент значения матрицы $A_{12}(\lambda)$.
5. Стр. 58, 4-я строка после замечания 2.8: написано $\eta(t)$, $t \in [-mh, +\infty)$, должно быть $\eta(t)$, $t \in [-mh, 0]$.
6. На странице 80 в примере 3.1 формула (3.45): написано $\dot{x}_1(t-h)$, должно быть $\dot{x}(t-h)$.
7. Страница 79 в томе Приложения, 2-я строка сверху: знак равенства указан два раза.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Содержание диссертации и полученные в ней результаты свидетельствуют о том, что квалификация В.Е. Хартовского соответствует ученой степени доктора физико-математических наук.

Вывод

Диссертационная работа Хартовского Вадима Евгеньевича является законченным самостоятельным квалификационным исследованием, соответствующим требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, содержит принципиально новые результаты, совокупность которых является крупным достижением в теории управления. В.Е. Хартовскому может быть присуждена ученая степень доктора физико-математических наук по специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление за концептуальное развитие теории управления системами с последействием, заключающиеся в разработке нового подхода к проектированию регуляторов, представленного в виде следующих результатов:

1. Критерии разрешимости задачи 0-управляемости и способы построения программных управлений, реализующих успокоение решения в случае линейных автономных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями.

2. Критерии существования и способы построения регуляторов успокоения решения для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями.

3. Критерии разрешимости задач спектральной приводимости и слабой спектральной приводимости и способы построения регуляторов, приводящих линейные автономные дифференциально-разностные системы нейтрального типа и линейные автономные вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы с соизмеримыми запаздываниями к конечному спектру.

4. Условия разрешимости задач модальной управляемости и слабой модальной управляемости в классах интегральных и дифференциально-разностных регуляторов, а также способы построения регуляторов указанных типов, обеспечивающих заданный спектр, для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями.

5. Условия существования и способы построения различных типов асимптотических наблюдателей, а также разработку процедуры нахождения асимптотической оценки для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа.

6. Критерии существования и способы построения для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа двух типов финитных наблюдателей, которые описываются системами запаздывающего типа с выходом, причем система, определяющая наблюдатель, имеет: 1) конечный наперед заданный спектр; 2) только сосредоточенные соизмеримые запаздывания и некоторый конечный спектр.

Официальный оппонент: Долгий Юрий Филиппович, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, профессор, 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, (343) 3507521, jury.dolgy@urfu.ru, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, профессор кафедры прикладной математики и механики

10.03.2023

Долгий

Долгий Ю.Ф.

Подпись *Долгий Ю.Ф.*
Заворюю: вед. документовед
Бурякина С.Ю.

