

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Федюкова Александра Анатольевича

«Синтез законов управления динамическими системами с ограничениями

на управляющие и фазовые переменные»,

представленную на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.01.02 –

дифференциальные уравнения, динамические системы и

оптимальное управление

Диссертация посвящена разработке на основе современных достижений теории управления, теории линейных матричных неравенств и теории выпуклой оптимизации новых подходов к построению законов управления в форме обратной связи по состоянию или по выходу для динамических систем с целью стабилизации заданного положения равновесия. Предполагается, что динамика системы описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, на фазовые и управляющие переменные наложены ограничения и в математической модели управляемого объекта может присутствовать неопределенность в задании параметров или состояние объекта измеряется с ошибкой.

Задачи управления со смешанными ограничениями, т.е. с ограничениями на управляющие и фазовые переменные, встречаются во многих приложениях. Такие задачи отличаются повышенной сложностью, в настоящее время не существует общего универсального метода их решения. Например, учёт фазовых и смешанных ограничений в рамках теории оптимального управления приводит к существенным трудностям даже для линейных систем. Представленные в современной научной литературе подходы к решению таких задач чаще всего основаны на идеях метода Ляпунова. Использование подходящей функции Ляпунова в ряде случаев позволяет оценить область притяжения замкнутой системы. Для соблюдения геометрических ограничений на управляющее воздействие в задачах стабилизации иногда применяют управления типа срезки линейного по фазовым переменным управляющего сигнала по величине ограничений. Каждый из этих подходов имеет свои недостатки. Кроме того, на практике, параметры реальных механических систем зачастую точно не заданы, известны лишь границы их возможных значений. Поэтому разработка новых методов и законов управления динамическими системами при наличии сложных ограничений на управляющие и фазовые переменные, а также в условиях

неполноты информации о параметрах системы, представляет собой актуальную тему для исследований, важную как для математической теории управления, так и для приложений.

Остановимся кратко на содержании представленной диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 109 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи исследования, аргументирована научная новизна, практическая значимость работы, выделены выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации результатов работы, сведения о публикациях, дано краткое изложение диссертации по главам.

Первая глава диссертации посвящена задаче стабилизации динамических систем по измеряемому с ошибкой состоянию с учетом ограничений на управляющие и фазовые переменные. Приводятся предварительные сведения о задаче стабилизации системы в условиях смешанных ограничений и полученные ранее другими авторами результаты, описывается подход, лежащий в основе решения, использующий S-процедуру и методы линейных матричных неравенств. Затем дается строгая постановка задачи об оценке области притяжения состояния равновесия системы при наличии ошибки в измерении фазового состояния системы. При этом предполагается, что в используемом законе управления матрица обратной связи получена при решении задачи стабилизации с учетом ограничений, но с точно измеряемым состоянием. В терминах линейных матричных неравенств выведены достаточные условия, позволяющие оценить область притяжения состояния равновесия замкнутой системы в указанной ситуации. Оценка этой области равняется пересечению множеств, которые представляет собой оценку области притяжения, полученную при учете каждого ограничения в отдельности. Сформулирована и доказана соответствующая теорема, которая составляет основной результат первой главы диссертации.

Работоспособность предложенного подхода к оценке области притяжения состояния равновесия продемонстрирована с помощью численного моделирования, выполненного в пакете Matlab. В качестве примеров рассмотрены задача стабилизации перевернутого маятника с помощью момента, приложенного к точке подвеса, и задача о движении ферромагнитного тела в электромагнитном подвесе. Численно проведен параметрический анализ зависимости размера области притяжения от величины погрешности в измерении состояния.

Во второй главе диссертации рассмотрена задача стабилизации динамических систем с помощью управления по измеряемому выходу при наличии геометрических ограничений на фазовые переменные. Сначала обсуждается вопрос о построении

управления в виде линейной обратной связи по измеряемому выходу в отсутствие ограничений, приводятся основные подходы к поиску матрицы коэффициентов обратной связи в законе управления, представленные в научной литературе. Далее диссертант переходит к изучению системы с фазовыми ограничениями и доказывает теорему, представляющую собой достаточные условия стабилизации положения равновесия. Эти условия сформулированы в виде линейных матричных неравенств, в которых фигурируют матрица коэффициентов обратной связи и матрица, задающая квадратичную функцию Ляпунова. Приведены некоторые алгоритмы вычисления этих матриц,

Затем диссертант переходит к решению задачи об оценке области притяжения состояния равновесия замкнутой управлением системы в случае наличия ошибок в измерении выходных переменных. При этом предполагается, что в используемый закон управления получен при решении задачи стабилизации с учетом ограничений, но с точно измеряемым выходом. В терминах линейных матричных неравенств сформулированы условия, позволяющие оценить область притяжения состояния равновесия замкнутой системы в указанной ситуации. Как и в главе 1, в качестве иллюстративных примеров приведены результаты численного моделирования динамики перевернутого маятника и ферромагнитного тела в электромагнитном подвесе, стабилизируемых с помощью предложенных законов управления. Здесь также проведен численный параметрический анализ зависимости размера области притяжения от величины погрешности в измерении выходных переменных.

Третья глава посвящена задаче стабилизации состояния равновесия систем с помощью динамического регулятора при наличии ограничений на фазовые переменные. Как и в задачах, рассмотренных в других главах диссертации, применяемый подход основан на использовании квадратичных функций Ляпунова и аппарата линейных матричных неравенств. Сначала описывается методика построения стабилизирующего динамического регулятора (в том числе, с заданной степенью устойчивости) в отсутствие ограничений на фазовые переменные. Затем эта методика обобщается на системы с фазовыми ограничениями. В теореме 3.1 предложена система линейных матричных неравенств, решение которой задает параметры динамического регулятора, а также в терминах линейных матричных неравенств описана такая область фазового пространства, что начинающиеся в ней траектории замкнутой таким регулятором системы удовлетворяют фазовым ограничениям задачи. В теореме 3.2 дано решение задачи синтеза динамического регулятора полного порядка, обеспечивающего асимптотическую устойчивость замкнутой системы с заданной степенью устойчивости, описан алгоритм поиска такого регулятора полного порядка.

Затем в третьей главе поставлена и решена задача об оценке области притяжения для состояния равновесия замкнутой системы в случае наличия ошибки в измерении выходных переменных. В терминах линейных матричных неравенств сформулированы условия, позволяющие оценить область притяжения в указанной ситуации (теорема 3.3).

В качестве иллюстрации эффективности разработанного подхода приведены результаты численного моделирования движения ферромагнитного тела в электромагнитном подвесе, которое стабилизируется с помощью динамического регулятора по выходу при ограничениях на фазовые переменные.

Четвертая глава диссертации посвящена задаче стабилизации по состоянию линейных динамических систем с учетом ограничений на фазовые и управляющие переменные и в условиях, когда параметры системы известны неточно. Это важная для приложений постановка задачи, поскольку на практике о параметрах реальных механических систем зачастую известно лишь то, что они заключены в некоторых интервалах. Как и ранее, в основе развиваемого подхода к решению лежит метод квадратичных функций Ляпунова, а также аппарат теории линейных матричных неравенств. В главе дана строгая постановка задачи, сформулированы и доказаны достаточные условия для поиска матрицы коэффициентов обратной связи такого робастного закона управления.

В качестве примера рассмотрена задача о стабилизации двухмассовой упругой системы, параметры которой (массы, коэффициенты жесткости пружин, коэффициент трения) заданы интервально.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

В диссертации Федюкова А.А. получены следующие новые научные результаты.

1. Развита методика, позволяющая строить оценки для области притяжения состояния равновесия линейной динамической системы при наличии ограничений на фазовые и управляющие переменные, а также в условиях неточных измерений фазового состояния системы. При этом используется закон управления, полученный при решении задачи стабилизации с учетом ограничений, но с точно измеряемым состоянием.

2. Предложен подход к построению закона управления в форме линейной обратной связи по измеряемому выходу линейной динамической системы, который обеспечивает стабилизацию состояния равновесия и выполнение заданных ограничений на фазовые переменные. Получена оценка для области притяжения состояния равновесия замкнутой системой, в том числе и для случая, когда есть ошибки в измерениях выходных переменных.

3. Поставлены и решены задачи синтеза динамических регуляторов как полного, так и пониженного порядков, которые обеспечивают стабилизацию линейной динамической системы с заданной степенью устойчивости и с соблюдением заданных ограничений на фазовые переменные. Получена оценка для области притяжения состояния равновесия замкнутой системы, в которой эти регуляторы будут обеспечивать стабилизацию замкнутой системы с заданной степенью устойчивости, в том числе и для случая, когда выходные переменные измеряются с ошибкой.

4. Предложен подход к построению законов управления, которые обеспечивают стабилизацию по состоянию линейных динамических систем с учетом ограничений на фазовые и управляющие переменные и в условиях, когда параметры системы известны неточно.

Все выносимые на защиту научные результаты являются новыми и представляют несомненный интерес.

Замечания по тексту диссертацию. Существенных замечаний по содержанию диссертации и ее научной значимости у меня нет. Есть несколько замечаний, которые носят скорее редакционный характер.

На стр. 17 неудачно описан эллипсоид:

«... множества $E(Y) = \{x: x^T Y^{-1} x \leq 1\}$, ограниченного эллипсоидом $x^T Y^{-1} x \leq 1$ »

На стр. 18 еще одна неудачная формулировка: «Заметим, что существует бесконечное множество матриц Y , удовлетворяющих системе матричных неравенств (1.1.7). Это в свою очередь означает, что существует бесконечное множество начальных состояний, определяемых соответствующими эллипсоидами». На самом деле, существует бесконечное множество эллипсоидов, а начальных состояний бесконечно много даже в одном эллипсоиде. Такая же формулировка встречается на стр. 46.

На стр. 20 определение асимптотической устойчивости начинается необычно:

«О п р е д е л е н и е 1.1. Известно [10], что...»

На стр. 37 было разъяснено, что такое билинейное матричное неравенство, однако на стр. 62 вновь написано: «Такие матричные неравенства называются билинейными».

На стр. 57 в формула (3.1.4) пропущен индекс c (должно быть V_c).

В тексте встречаются опечатки и отдельные грамматические ошибки. Например, у прилагательного «неизмеряемый» частица «не» пишется отдельно.

Указанное замечание не влияет на положительную оценку диссертации в целом.

Характеризуя работу в целом, стоит отметить, что научная значимость диссертации состоит в разработке нового подхода к построению законов управления, которые обеспечивают стабилизацию линейных динамических систем с учетом ограничений на

фазовые и управляющие переменные, при наличии ошибок в измерениях состояния или выхода и в условиях неопределенности параметров, а также в оценке получающейся области притяжения стабилизируемого положения равновесия. Результаты, приведенные в диссертации, изложены ясно и подробно, обоснованы полными доказательствами, проиллюстрированы результатами численного моделирования. При получении результатов и написании диссертации автор проделал очень большую аналитическую работу. Основные результаты диссертации получены самостоятельно, прошли серьезную апробацию и своевременно опубликованы в 21 научной работе, из которых 7 опубликованы журналах из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Сама диссертация является законченной научно-исследовательской работой. Содержание автореферата полно и правильно отражает основные положения диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа «Синтез законов управления динамическими системами с ограничениями на управляющие и фазовые переменные» отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Федюков Александр Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.02 – Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

Официальный оппонент:

Ананьевский Игорь Михайлович

доктор физико-математических наук

по специальности 01.02.01 - Теоретическая механика, профессор,

заведующий лабораторией механики управляемых систем,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского

Российской академии наук»

119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

Телефон: +7 (495) 434-92-63

Email: anan@ipmnet.ru



Ананьевский Игорь Михайлович

Подпись сотрудника ИПМех РАН

И. М. Ананьевского удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМех РАН



М. А. Котов
22 августа 2022 г.