

Учёному секретарю совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 002.073.04 на базе Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), доктору технических наук, профессору В. Н. Крутько
119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Даник Юлии Эдуардовны **«Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)»

Актуальность темы. Стабилизации нелинейных систем управления уже долгое время уделяется внимание в теории оптимального управления. Сложность решения этих задач приводит к поиску различных подходов по построению приближенных вычислительно-эффективных алгоритмов, реализуемых в режиме реального времени на различных технических объектах управления. Даже в случае наличия слабой нелинейности в системе линейные регуляторы проигрывают нелинейным регуляторам. Их эффективность тем выше, чем больше нелинейность и начальные возмущения системы. Слабонелинейные системы могут быть описаны разностными и дифференциальными уравнениями с малым параметром при нелинейности. Варьируя параметр, можно изменять степень влияния нелинейности и тем самым охватывать достаточно широкий класс систем. Таким образом, диссертационная работа Ю.Э. Даник, посвященная вопросам построения приближенного решения задач стабилизации слабонелинейных систем управления является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка численно-аналитических алгоритмов построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- построение приближенного решения матричного алгебраического уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами и получение на его основе стабилизирующего регулятора для квазилинейной дискретной системы управления с параметром и с коэффициентами, зависящими от состояния;
- исследование робастности построенных регуляторов относительно параметрических неопределенностей в линейной части системы;
- приближенное решение дискретных задач оптимального управления с малым шагом на основе прямой схемы построения асимптотики;
- построение параметрического семейства стабилизирующих регуляторов на основе приближенного решения матричного алгебраического уравнения Риккати для непрерывной нелинейной системы управления с параметром и с коэффициентами, зависящими от состояния с использованием метода Паде аппроксимации.

Методы исследования. Для достижения целей диссертации используются методы построения стабилизирующих регуляторов для непрерывных и дискретных систем управления, методы приближенных решений нелинейных уравнений и алгоритмы Паде аппроксимации, а также техника линейных матричных неравенств и теории возмущений.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследований:

- разработаны алгоритмы конструирования стабилизирующих регуляторов для дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния на основе асимптотики при малых значениях параметра;
- построены матричные одноточечная и двухточечная Паде аппроксимации для решения матричного алгебраического уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния, в непрерывном случае;
- получено параметрическое семейство Паде-регуляторов для непрерывных систем с параметром, принимающим как малые, так и большие положительные значения;
- результаты, полученные в теоретической части работы, могут быть использованы для построения управляющих воздействий слабонелинейными дискретными и непрерывными системами.

Достоверность полученных результатов диссертационных исследований определяется строгими доказательствами, опирающимися на методы современной математической теории систем управления, математического моделирования, результаты которых согласуются с известными данными, опубликованными в открытой печати.

Апробация работы. Основные положения диссертации прошли апробацию на научных симпозиумах, конференциях, семинарах различного уровня.

Публикации. Материалы диссертационной работы содержатся в 17 печатных работах опубликованных в журналах соответствующих специальности 05.13.01 (в том числе 3 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации и 14 публикаций в трудах научных конференций).

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 4 главы, заключения и списка литературы из 97 наименований источников отечественных и зарубежных авторов. Диссертация содержит 138 страниц машинописного текста.

Обзор диссертационной работы

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, формулируется цель исследований и задачи исследования, требующие решения для достижения поставленной цели, а также аргументируется научная новизна работы и ее практическая ценность.

Глава 1. Теоретические сведения.

Глава содержит обзорный материал математической теории управления. Соискатель описывает текущее состояние науки в области методов построения стабилизирующих регуляторов для непрерывных и дискретных нелинейных систем управления на основе решения уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния (State dependent Riccati equation, SDRE техника), а также приводит основные сведения, касающиеся теории устойчивости, оценки робастности замкнутой системы с использованием линейных матричных неравенств, асимптотических методов, техники Паде-аппроксимации, методов приближенного решения нелинейных уравнений. Представленный в первой главе материал используется в диссертации в качестве теоретической базы для разработки новых методов построения стабилизирующих регуляторов.

Глава 2. Построение стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных дискретных управляемых систем.

Здесь рассмотрена задача построения стабилизирующих управлений для дискретных слабонелинейных управляемых систем с малым параметром при нелинейности или регулярно возмущенных систем. В качестве техники используется дискретный вариант подхода SDRE, закрепившийся в литературе под названием D-SDRE (Discrete-time state dependent riccati equation). Представлено сравнение различных алгоритмов в рамках этого подхода, показана проблема, связанная с поиском соответствующих решений уравнения Риккати для разных значений вектора состояния. Предложен численно-аналитический алгоритм приближенного решения этого уравнения и получения на его основе стабилизирующего регулятора путем построения асимптотического разложения по малому параметру k -ого

порядка. Для каждого из членов разложения получается отдельное более простое уравнение, часть из которых имеет аналитическое решение. При этом в процессе конструирования регулятора строится критерий качества управления. Выбор матриц критерия во время построения управления отражает субъективность выбора критерия качества и является аналогом обратной задачи оптимального управления. Вторая часть главы посвящена оценке робастности замкнутой системы с построенным регулятором по отношению к интервальным параметрическим неопределенностям в линейной части матриц системы с использованием техники линейных матричных неравенств. Область неопределенности представляется в виде выпуклого политопического множества, задаваемого выпуклой комбинацией конечного числа матриц-вершин. В последнем параграфе второй главы рассматривается задача построения качественного начального приближения к решению дискретной задачи оптимального управления с малым шагом при наличии ограничений на состояние и управление. Эти системы относятся к классу сингулярно возмущенных задач управления и здесь для них построено формальное нулевое равномерное асимптотическое приближение, включающее регулярный и пограничные ряды.

Глава 3. Конструирование Паде-регуляторов для нелинейных непрерывных систем управления.

В третьей главе рассмотрена задача конструирования параметрического семейства управлений для двух классов непрерывных нелинейных систем с параметром в правой части, который может принимать как малые, так и большие значения. Предлагаемый подход заключается в конструировании регулятора для всех значений параметра из заданной области путем использования двух асимптотических разложений при малых и больших значениях параметра для построения на их основе матричной Паде аппроксимации. Приводятся условия разрешимости для членов асимптотических разложений и доказываются оценки близости построенных приближений к точному решению соответствующего матричного алгебраического уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами. Впервые строятся одноточечная и двухточечная матричные Паде-аппроксимации (Паде-мосты) решения матричного уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами и приводятся условия существования Паде-аппроксимаций. Для сравнения построенных регуляторов при разных значениях параметра применяется нелинейный критерий качества управления. Представлено строгое обоснование стабилизации параметрической управляемой системы Паде-мостом при всех положительных значениях параметра, где система при малых значениях параметра является слабоуправляемой системой, а при больших значениях параметра – системой с большим коэффициентом усиления в случае постоянных матриц (для стационарных непрерывных линейных управляемых систем).

Глава 4. Численные эксперименты

В четвертой главе представлен материал численных экспериментов с разработанными алгоритмами управления. Во-первых, приводятся эксперименты, демонстрирующие стабилизацию слабонелинейной дискретной системы управления с помощью предложенного алгоритма управления и показана его эффективность по значению критерия качества и показателю перерегулирования по сравнению с линейным регулятором при разных начальных условиях и в случае наличия неопределенностей в модели управляемой системы. Во-вторых, для дискретных систем с малым шагом и ограничениями на состояние и управление получено хорошее качественное приближение к управлению на основе формального нулевого равномерного асимптотического приближения.

В-третьих, показано, что существуют области изменения параметров, в которых Паде-мост стабилизирует нелинейную непрерывную систему с параметром в правой части (с параметром при нелинейности в матрицах системы и с параметром при управлении). Численные эксперименты показали, что построенная двухточечная Паде-аппроксимация (Паде-мост) практически совпадает с точным на выбранных интервалах изменений параметра. Проведено сравнение алгоритмов, полученных на основе отдельных асимптотических разложений и Паде-аппроксимаций.

В заключении диссертации представлены основные результаты диссертационной работы, к которым следует отнести:

- 1) разработаны и обоснованы алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов на основе асимптотических приближений для дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния;
- 2) установлены условия робастности нелинейной системы по отношению к параметрическим возмущениям в ее линейной части;
- 3) построены одноточечная и двухточечная матричные Паде аппроксимации для решения матричного алгебраического уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния, в непрерывном случае и установлены их свойства;
- 4) построено семейство стабилизирующих регуляторов для одного класса непрерывных линейных управляемых систем на основе Паде-моста, заключающее в себе стабилизирующие регуляторы для слабоуправляемых систем и систем с большим коэффициентом усиления;
- 5) выполнены численные эксперименты, демонстрирующие сравнительную эффективность построенных регуляторов.

По диссертации имеются следующие замечания:

Стр. 5. «Особенностью подхода является использование формальной структуры оптимального управления в линейно-квадратичной задаче. При этом получаемый регулятор зачастую оказывается достаточно близким к соответствующему оптимальному управлению».

В каком смысле «...достаточно близким...»?

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа Ю.Э. Даник «Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления» полностью соответствует критериям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, – Юлия Эдуардовна Даник, – заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)».

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор,

ординарный профессор

Департамента прикладной математики



Афанасьев В.Н.

E-mail: afanval@mail.ru

Московский институт электроники и математики

имени А.Н. Тихонова Национального исследовательского

университета «Высшая школа экономики»

123458, РФ, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34

+7 (495)916-88-29, <https://miem.hse.ru/>

Подпись Афанасьева В. Н. заверяю

8.10.2019

ВЕРШИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО
КАДРОВЫМ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
Живцова Ю.С.

