



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет»
доктор экономических наук,
профессор Д.А. Ендовицкий

Д.А. Ендовицкий
«2» октября 2019 г.

ОТЗЫВ ведущей организации

на диссертационную работу **Даник Юлии Эдуардовны**

«Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационно- вычислительное обеспечение)

Актуальность. Нелинейные динамические системы находят широкое применение в задачах управления различными техническими объектами. Поиск стабилизирующих регуляторов для нелинейных систем управления представляет определенную сложность, решение этой проблемы остается актуальным в теории оптимального управления.

Одним из эффективных стабилизирующих регуляторов является регулятор, в котором вводится выпуклый квадратичный критерий качества. При нахождении управления приходится решать матричное уравнение Риккати. При этом выпуклость критерия качества приводит к построению стабилизирующих управлений.

Интересный класс для анализа представляют собой слабонелинейные системы, моделирующиеся с помощью малого параметра при нелинейной части. Наличие параметра позволяет использовать мощный аппарат теории асимптотических методов для построения приближенного решения задач.

Существуют различные методы и подходы конструирования субоптимальных синтезирующих управлений, стабилизирующих нелинейные системы как с непрерывным, так и с дискретным временем. Одним из таких подходов является метод, основанный на решении матричного уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния (State-dependent Riccati equation, SDRE) и представлении системы в квазилинейной форме с матрицами, зависящими от состояния. Поэтому тема диссертационной работы Даник Юлии Эдуардовны безусловно актуальна.

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

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основной текст работы изложен на 138 страницах. Список литературы состоит из 97 наименований.

В диссертации предложен метод построения стабилизирующих регуляторов для дискретных и непрерывных систем с параметром на основе приближенного решения SDRE с использованием асимптотических методов.

Во введении обосновывается актуальность темы работы, формулируется цель диссертации и научная новизна полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору известных результатов по стабилизации нелинейных систем управления с помощью подхода SDRE, оценке устойчивости методом функций Ляпунова и исследованию робастности с использованием линейных матричных неравенств, асимптотическим методам и Паде аппроксимации, а также приближенному решению нелинейных уравнений.

Во второй главе рассматриваются системы с дискретным временем. Для систем в форме с коэффициентами, зависящими от состояния (State-dependent coefficients, SDC), а также с малым параметром при нелинейных частях матриц системы и критерия, строится нелинейный синтезирующий регулятор, основанный на формальном асимптотическом приближении k -ого порядка к решению матричного алгебраического уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами. Для части получающихся уравнений для членов асимптотики решение может быть найдено в аналитической форме. Используется подход по конструированию критерия в процессе построения регулятора путем выбора матриц критерия так, чтобы обеспечить разрешимость уравнений для членов разложения. Показано, что получающийся численно-аналитический алгоритм управления в вычислительном плане более простой, чем исходный SDRE регулятор, кроме того, что он обеспечивает стабилизацию системы при выполнении ряда условий, он также обеспечивает некоторую робастность. Разложение матриц системы, критерия и решения уравнения Риккати в ряд по степеням параметра упрощает анализ системы и позволяет делать утверждения об устойчивости и робастности.

Помимо регулярно возмущенных задач, рассмотрены дискретные задачи оптимального управления с малым шагом, относящиеся к классу сингулярно возмущенных, при наличии ограничений на состояние и управление. Построено приближенное формальное решение этой задачи на основе прямой схемы метода пограничных функций, качественно описывающее точное решение.

В третьей главе строятся асимптотические разложения решения матричного уравнения Риккати для двух классов непрерывных нелинейных систем с параметром в правой части, принимающего как малые, так и большие значения. Рассматриваются квазилинейные системы, с положительным параметром при нелинейности, и системы с большим коэффициентом усиления/слабоуправляемые системы. С помощью теоремы Ньютона-Канторовича доказаны оценки близости построенных асимптотических приближений к точному решению матричного уравнения Риккати. Впервые построена двухточечная матричная Паде аппроксимация (так называемый Паде-мост) решения уравнения Риккати, объединяющая два локальных асимптотических приближений, при малых и больших значениях параметра, соответственно. Доказано, что в случае

стационарной системы регулятор на основе Паде-моста стабилизирует замкнутую систему для всех положительных значений параметра.

В четвертой главе представлены результаты численных экспериментов с алгоритмами, полученными во второй и третьей главах диссертации. Экспериментально показано, что построенный для дискретных слабонелинейных систем управления нелинейный регулятор стабилизирует систему и имеет значительное преимущество по значению критерия качества управления по сравнению с линейным регулятором, в особенности при больших начальных возмущениях и наличии параметрических неопределенностей в модели.

На примерах показано, что если Паде-мост для непрерывных нелинейных систем управления существует, он обеспечивает качественное приближение к точному решению матричного уравнения Риккати для всех значений параметра из допустимой области. Рассмотренные примеры имеют и самостоятельный интерес.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна результатов

В диссертации Даник Ю.Э. получены следующие новые научные результаты:

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 слабонелинейной 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 эффективность построенных регуляторов.

Научная значимость полученных результатов заключается в обосновании и демонстрации использования асимптотических методов и Паде аппроксимаций для построения вычислительно эффективных стабилизирующих регуляторов для непрерывных и дискретных нелинейных систем.

Апробация полученных результатов. Основные результаты, полученные в диссертации, изложены в 17 публикациях, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (3 статьи), РИНЦ (6 публикаций), индексируемых в базах данных научного цитирования Scopus (5 публикаций) и Web of Science (4 публикации). Результаты докладывались на 9 конференциях: на 7-ми международных и 2-х всероссийских.

К достоинствам работы следует отнести то, что все результаты связаны с общей техникой, основанной на использовании асимптотических методов. Разработанные

численно-аналитические алгоритмы обеспечивают построение приближенных решений матричных уравнений Риккати для рассматриваемых классов задач управления в непрерывном и дискретном случаях, и получение на их основе стабилизирующих регуляторов. Разложение по параметру позволяет получить отдельные, более простые, задачи для каждого из членов разложения и обеспечить требуемую точность приближения. Получение аналитических выражений для членов асимптотического ряда позволяет снизить вычислительную сложность поиска решения.

Особенно важным результатом диссертационного исследования является построение матричного Паде-моста для решения уравнения Риккати, позволяющего расширить область действия асимптотик. Отметим перспективность развития этого направления при создании численно-аналитических параметрических семейств решений в теории управления.

В работе представлено сравнение предложенных автором диссертации алгоритмов с распространенными линейными регуляторами и регуляторами, полученными с помощью матричного уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния (техника SDRE).

Все основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Результаты исследований могут быть использованы в практической деятельности, например, при управлении различными робототехническими объектами.

Замечания

1. В диссертации рассматриваются автономные системы и не затрагиваются проблемы для неавтономных систем. Хотя неавтономные системы сводятся (с помощью замен переменных) к автономным, они имеют особенности и их можно было бы обсудить.
2. Имеются небольшие недостатки в оформлении работы. Например; На стр. 18 строка 4 сн. используется обозначение R^n а на стр. 17 строки 13, 14 используется обозначение R_n .
3. Почему в алгоритмах выбраны аппроксимации Паде? Есть много других аппроксимаций.
4. Автор ограничивается конечномерным случаем. Во введении или заключении можно было бы указать, какие результаты переносятся на бесконечномерный случай или на системы, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация и автореферат изложены четким ясным стилем, легко читаются.

Заключение. Диссертационная работа Даник Юлии Эдуардовны является завершенным научным исследованием, содержащим научно обоснованные численно-аналитические алгоритмы стабилизации слабонелинейных дискретных и непрерывных систем управления.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения по использованию асимптотических методов при решении матричного уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния.

Содержание диссертации Даник Ю.Э. соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)» в пунктах: 1) Теоретические основы и методы системного

анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 2) Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 3) Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 4) Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Диссертация Даник Ю.Э. соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. Полученные соискателем теоретические и практические результаты и опубликованные работы позволяют сделать вывод о высокой квалификации автора, хорошем знании предмета своего исследования. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации.

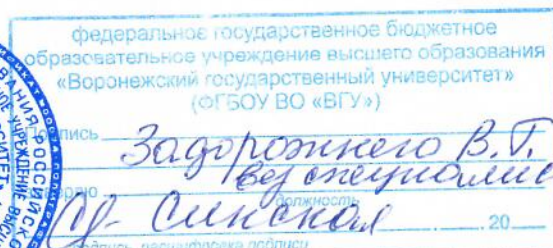
Таким образом, диссертационная работа Даник Юлии Эдуардовны «Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)».

Отзыв одобрен на заседании кафедры системного анализа и управления факультета прикладной математики, информатики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», протокол № 0602-1 от 02.09.2019.

Зав. каф. системного анализа и управления
факультета прикладной математики,
информатики и механики ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
университет», доктор физико-
математических наук, профессор

В. Г. Задорожний

2 октября 2019 г.



Адрес организации

394018, РФ, г. Воронеж, Университетская площадь, 1,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Телефон: +7 (473) 220-75-21, <http://www.vsu.ru/>