

Отзыв

официального оппонента на диссертацию **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)».

Теория оптимального управления на протяжении своей многолетней истории постоянно показывает, что практические задачи дают новый стимул для получения, как новых теоретических результатов, так и эффективного использования хорошо известных в новом ракурсе. Диссертация Даник Ю.Э. является тому наглядное доказательство. Задача стабилизации для непрерывных и дискретных слабонелинейных систем – предмета активного изучения в последние годы, позволила автору привлечь хорошо разработанный аппарат построения стабилизирующих регуляторов для линейно-квадратических систем, теории алгебраических матричных уравнений Риккати, метода SDRE и асимптотических методов. Развитие указанного набора позволило получить интересные теоретические результаты и создать численно-аналитические алгоритмы, позволяющие решать практические задачи. Все это говорит об актуальности выполненного исследования.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, приведены сведения о выполненном исследовании: такие как количество и качество публикаций, выступления на конференциях и т.д.

Первая глава представляет собой обзор литературы. Следует отметить добросовестный подход автора, ознакомившегося с солидным количеством

известные результаты по устойчивости непрерывных и дискретных систем; линейным матричным неравенствам, необходимым для оценки робастности регуляторов; асимптотическим методам; Паде аппроксимациям; матричным уравнениям Риккати и Ляпунова; методам приближенных решений нелинейных матричных уравнений.

По своему смыслу диссертация разделена на две части. В первой (глава 2) рассматривается задача стабилизации для слабонелинейных дискретных систем, а во второй (глава 3) та же задача для слабонелинейных непрерывных систем с параметром.

Во второй главе приведена постановка задачи конструирования стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных систем с дискретным временем. Подробно описаны этапы построения метода приближения к решению SDRE k -ого порядка и основанного на нем численно-аналитического алгоритма стабилизирующего управления. Кроме того, дан анализ робастности построенного регулятора по отношению к интервальным параметрическим неопределенностям с использованием техники линейных матричных неравенств и приведен результат сравнения с другими SDRE регуляторами по вычислительной сложности. Кроме того, сформулированы и доказаны две теоремы о свойствах метода, а также теорема о робастности срединного регулятора.

В конце главы рассмотрена дискретная задача оптимального управления с малым шагом при наличии ограничений, которая сведена к сингулярно возмущенным задачам управления. Продемонстрирована возможность использования метода прямой схемы для построения асимптотического разложения решения вариационной задачи и описания поведения оптимального решения на магистральных участках, а также погранслойных эффектов вблизи границ интервала. В результате получен итерационный метод решения задач с большим количеством шагов.

В третьей главе Даник Ю.Э. рассмотрены два класса систем с непрерывным временем и с параметром в правой части, который может принимать произвольные положительные значения: в первом классе систем

параметр стоит при нелинейности в матрицах системы (слабонелинейные управляемые системы при малых значениях/сильно нелинейные при больших значениях параметра), а во втором – только при управлении (слабоуправляемые системы/системы с большим коэффициентом усиления). Для этих двух классов систем предложен оригинальный алгоритм конструирования регулятора, основанный на решении уравнения Риккати. В основе предлагаемого решения лежит использование Паде аппроксимаций. Также, как и во второй главе, автором сначала построены асимптотические разложения решения SDRE, но уже по двум значениям параметра (малое и большое), а для получения общего решения, параметрического семейства регуляторов для всех допустимых значений параметра, асимптотические разложения объединены в единую конструкцию с использованием Паде аппроксимаций. Использование такой техники обосновывается возможностью построения как одноточечных, так и многоточечных аппроксимаций, улучшающих качество приближения по сравнению с отдельными разложениями, на которых они основаны. Предложен алгоритм конструирования одноточечной и двухточечной Паде аппроксимаций (Паде-моста) для решения уравнения Риккати и получено параметрическое семейство Паде-регуляторов на их основе. Доказана теорема об асимптотической устойчивости замкнутой системы с Паде-регулятором при всех допустимых значениях параметра для одного класса управляемых систем. Кроме того, сформулированы условия существования асимптотических разложений по малому и большому значению параметра, доказаны оценки близости к точному решению с применением метода Ньютона-Канторовича, приведены условия существования Паде аппроксимаций. Проведен анализ вычислительной сложности построенных регуляторов.

В четвертой главе представлены результаты численных экспериментов с разработанными в ходе исследования алгоритмами. Качество работы регуляторов оценивается по значению нелинейного критерия, а также по ряду других показателей, например оценке перерегулирования. Для

экспериментов использованы два примера: перевернутый маятник и перевернутый маятник на тележке. Продемонстрировано преимущество построенного регулятора для дискретной системы управления по сравнению с линейным регулятором, в частности сохранение устойчивости замкнутой системы в более широкой области изменения параметров неопределенности. На примерах показано, что построенные Паде-регуляторы обеспечивают стабилизацию замкнутой системы, а также являются более эффективными по значению критерия, чем регуляторы, основанные на отдельных асимптотических разложениях решения уравнения Риккати. Построенные Паде аппроксимации обеспечивают качественное приближение к точному решению SDRE при всех рассмотренных значениях параметра, что обосновывает использование Паде-моста.

Для дискретных задач управления с малым шагом с помощью предложенного алгоритма получено качественное начальное приближение к оптимальному управлению в условии наличия ограничений на состояния и управления.

Дано подробное описание используемых в экспериментах уравнений, а сами результаты сопровождаются солидным количеством таблиц и графиков, способствующих лучшему пониманию полученных результатов и демонстрирующих эффективность разработанных алгоритмов.

В заключении приведены основные результаты, полученные автором.

К достоинствам работы Даник Ю.Э. можно отнести следующие результаты: 1) Разработаны алгоритмы конструирования стабилизирующих регуляторов для дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния на основе асимптотики решения алгебраического уравнения Риккати при малых значениях параметра; 2) Показано, что при выполнении ряда условий построенный регулятор для дискретной слабонелинейной системы с коэффициентами, зависящими от состояния, обладает свойством робастности относительно параметрических неопределенностей в линейных частях системы; 3) Построено приближенное решение дискретных задач оптимального управления с малым шагом на

основе прямой схемы метода пограничных функций; 4) Построены и обоснованы матричные одноточечная и двухточечная Паде аппроксимации для решения матричного алгебраического уравнения Риккати с коэффициентами, зависящими от состояния, в непрерывном случае; 5) Получено параметрическое семейство Паде-регуляторов для непрерывных систем с параметром, принимающим как малые, так и большие положительные значения; 6) Сформулированы и доказаны теоремы о свойствах разработанных алгоритмов.

По работе можно сделать ряд замечаний: 1) На стр. 13, 14 приведены две разные формы записи функции Понтрягина H ; 2) На стр. 28 в пункте 3 леммы Ляпунова использован женский род (симметричная) вместо среднего; 3) На стр. 48 повтор слова «теперь»; 4) Разумно было бы подчеркнуть для формулы (3.1), всегда ли возможно указанное представление; 5) Для строгости изложения в переходе от параметра ε к параметру μ следовало подчеркнуть малость последнего; 6) Для формулы (3. 22) разумно указать выбор эвристики, как это сделано ниже для (3.25); 7) На стр. 72 после формулы (3.6) использован не тот падеж, хотя ниже в той же ситуации для формулы (3.8) формулировка верная; 8) Следовало оговорить ситуацию с возможным обращением в нуль знаменателя Паде аппроксимации; 9) Ничего не сказано ни для дискретных, ни для непрерывных систем о возможном несуществовании решения уравнения Риккати.

Сделанные замечания не уменьшают ценности выполненной Даник Ю.Э. работы, а имеют целью дать автору одно из направлений для дальнейших исследований.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

На основании изложенного считаю, что диссертация Даник Юлии Эдуардовны «Численно-аналитические алгоритмы построения стабилизирующих регуляторов для слабонелинейных непрерывных и дискретных систем управления» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор, Ю.Э. Даник, заслуживает

присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)».

Официальный оппонент

главный научный сотрудник
Исследовательского центра
Системного анализа ИПС РАН,
доктор физико-математических наук,
доцент

 И. В. Расина
23.09.2019

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук,
Адрес: 152020, Ярославская обл., Переславский район, село Веськово,
ул. Петра Первого, дом 4 "а", ИПС РАН, <http://www.psi-ras.ru/>,
тел. /факс: +7 (4852) 695-228, e-mail: irinarasina@gmail.com

Юрий Васильевич ИВ
Николаевич
ИВ

