

Отзыв официального оппонента  
о диссертации

**Белова Алексея Анатольевича**

на тему «**Методы и алгоритмы анизотропийного управления линейными дескрипторными и параметрически неопределенными системами**»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации).

**Актуальность темы.**

Диссертация Белова А.А. посвящена решению проблемы анализа и синтеза для класса линейных разностных дескрипторных систем, как с точными, так и неопределенными параметрами, при учете влияния случайных возмущений с неопределенными статистическими характеристиками. Данная проблема является актуальной в связи с наличием большого количества объектов, динамика которых может быть представлена алгебро-разностными уравнениями: различные дискретные устройства, трафик в компьютерных сетях и многие другие. Актуальность проблемы возрастает в связи с большим распространением вычислительной техники и тенденцией цифровизации различных процессов в промышленности и других отраслях экономики страны.

Целью диссертационного исследования является разработка новых методов анализа и синтеза для класса линейных дескрипторных систем на основе анизотропийного подхода к описанию внешних возмущений и обобщение методов анизотропийной теории управления на некоторые классы параметрически неопределенных систем.

В теории управления параллельно развивались подходы и методы анализа и синтеза систем с неопределенностями в детерминированной и в стохастической постановке. В то же время системы автоматического управления в процессе функционирования подвергаются влиянию внешних возмущений, имеющих как детерминированную, так и стохастическую природу. Поэтому разработка методов анализа и синтеза систем, функционирующих в условиях детерминированных неопределенностей, так и неопределенностей статистических характеристик внешних возмущений и шумов измерений, является актуальной проблемой.

Исследование выполнено в рамках научной школы ИПУ РАН, развивающей анизотропийную теорию управления.

**Структура и содержание работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 277 страниц. Диссертация содержит 10 таблиц и 35 иллюстраций. Список литературы содержит 282 наименования.

Введение посвящено обоснованию актуальности решаемых в работе задач, приведен краткий обзор литературы по рассматриваемой тематике, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе дается краткая теоретическая справка по известным результатам теории дескрипторных систем, а также основные понятия и определения из теории анизотропийного управления, которые необходимы для дальнейшего изложения.

Глава 2 посвящена решению задачи анизотропийного анализа для дескрипторных систем с точно известными параметрами. Приводятся аналитические выражения, позволяющие проверить систему на причинность и устойчивость, а также оценить величину анизотропийной нормы системы, имеющей смысл коэффициента усиления от случайного возмущения к выходу системы. Результаты сформулированы с помощью различных техник.

В третьей главе решаются задачи оптимального и субоптимального синтеза для дескрипторных систем с точно заданными параметрами. Рассматриваются как решение задачи на основе техники Риккати, так и подход, основанный на линейных матричных неравенствах.

В четвертой главе рассмотрены дескрипторные системы с ограниченной по норме параметрической неопределенностью. В качестве решаемых задач рассматриваются задачи анизотропийного анализа, синтеза робастного анизотропийного регулятора, в том числе и с заданным расположением конечных полюсов замкнутой системы.

Глава 5 посвящена решению задач робастного анизотропийного анализа и синтеза для линейных разностных систем с параметрическими неопределенностями. Рассматривается два класса неопределенностей – политопические и ограниченные по норме. Полученные результаты сформулированы в терминах линейных матричных неравенств.

Каждая глава заканчивается краткими выводами.

В заключении приводятся выводы по всей работе.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации)» по пунктам:

п.1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п. 8. Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем.

## Научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В диссертации А.А.Белова представлены следующие, обладающие научной новизной, основные результаты:

1. Разработаны методы и алгоритмы вычисления анизотропийной нормы для класса линейных дискретных дескрипторных систем с использованием обобщенных алгебраических уравнений Риккати и методов выпуклой оптимизации.

2. Предложены методики анализа качества и синтеза оптимального по анизотропийному критерию управления при полном и неполном измерении вектора состояния на основе обобщенных алгебраических уравнений Риккати для рассматриваемого класса дескрипторных систем.

3. Предложен метод синтеза анизотропийного регулятора в виде обратной связи по состоянию с расположением конечных полюсов дескрипторной системы в заданной области комплексной плоскости.

4. Разработаны способы и алгоритм оценки сверху анизотропийной нормы, методы анализа и синтеза робастного анизотропийного управления линейных разностных и алгебро-разностных систем с ограниченными по норме параметрическими неопределенностями. При полном измерении вектора состояния при синтезе анизотропийного управления также предложено учитывать требуемое расположение конечных полюсов замкнутой системы.

5. Предложен способ оценки сверху  $H_\infty$  нормы, а также разработан метод синтеза робастного  $H_\infty$  регулятора для дескрипторной системы с ограниченными по норме параметрическими неопределенностями на основе линейных матричных неравенств.

6. Предложены алгоритм оценки сверху анизотропийной нормы, методы робастного анизотропийного анализа и управления в форме обратной связи по состоянию для линейных разностных уравнений с политопическими параметрическими неопределенностями.

Научная новизна полученных результатов состоит в обобщении и развитии теории стохастического робастного управления для новых типов объектов управления, представленных алгебро-разностными уравнениями, а также имеющих параметрические неопределенности.

Предложенные методы и алгоритмы анализа позволяют оценить качество дискретных систем управления при учете влияния случайных возмущений с неопределенными статистическими характеристиками, а методы синтеза позволяют снизить консерватизм замкнутых систем по сравнению с  $H_2$  регуляторами, повышая робастность по отношению к статистическим неопределенностям в распределениях случайных возмущений по сравнению с  $H_2$  регуляторами. Известные в теории управления процедуры анализа и синтеза для LQG/ $H_2$  и  $H_\infty$  подходов получают как частные случаи развиваемого в диссертации анизотропийного подхода. Предложенные методы учитывают характерные

особенности дескрипторных систем, допускают компьютерную реализацию. Они апробированы на ряде примеров конкретных систем.

Практическая значимость полученных результатов состоит в улучшении помехозащищенности и робастности систем управления, находящихся под влиянием случайных внешних возмущений, а также повышении степени их автономности за счет более эффективного использования управляющего воздействия.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в научно-исследовательских и опытно-конструкторских организациях, занимающихся разработкой цифровых систем автоматического управления.

**Достоверность научных результатов подтверждается** четкими формальными постановками задач, строгостью применяемого математического аппарата при выводе аналитических выражений, доказательствами сформулированных утверждений и подтверждается компьютерным моделированием численных примеров, а также соответствием полученных расчетно-теоретических результатов в частных случаях результатов исследований других авторов.

Диссертационное исследование было поддержано грантами РФФИ (14-08-00069 а, 16-38-00216 мол\_а, 17-08-00185 а, 18-38-00076 мол\_а), грантом РНФ 18-71-00105, а также в рамках государственной программы финансовой поддержки ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

**Публикации и личное участие автора в получении результатов диссертации.**

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора. По теме диссертации опубликовано 39 работ. В том числе 2 монографии (1 индексируется в Web of Science и Scopus), 16 журнальных статей в рецензируемых изданиях (15 индексируются в Web of Science и Scopus, а 1 индексируется в Scopus), 20 статей в сборниках конференций (11 индексируются в Web of Science и Scopus, 5 индексируются в Scopus, 4 конференции индексируются в РИНЦ), 1 брошюра. Результаты работы докладывались и обсуждались на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях. Личный вклад соискателя отражен в автореферате.

Автореферат диссертации правильно отражает основные результаты диссертационной работы.

### **Недостатки диссертационной работы.**

1. Не до конца понятным остался вопрос, почему в диссертации рассматриваются системы с дискретным временем. То, что согласно замечанию 1 непрерывную систему можно дискретизировать, является не вполне достаточным основанием выбора предмета исследования. Существует

много реальных объектов, функционирующих в дискретном времени. Примеры таких объектов в диссертации не приводятся.

2. В диссертации и автореферате не совсем четко отмечена научная новизна полученных результатов.

3. В диссертации представлено достаточное количество примеров иллюстрирующих возможности предлагаемых методов анализа и синтеза, но только 2 из них имеют прикладное содержание. Модели этих примеров в основном получены дискретизацией непрерывных моделей.

4. Разработанные в диссертации методы применимы к линейным дискретным системам (в том числе дескрипторным). Осталось не ясным возможность их применения к нелинейным дискретным системам.

5. В теории управления дискретными линейными системами больше внимания уделяется вопросам синтеза регуляторов при неполном измерении вектора состояния. Однако в других источниках и, в частности, в диссертационной работе не рассматривается задача субоптимального управления для дескрипторных систем по выходу. Автору следовало бы прокомментировать, почему подобные задачи не решаются.

6. Имеются редакционные замечания: На стр. 22 сказано, что диссертация состоит из шести глав, хотя их всего пять. В определении 1.3 (стр 31) ссылка на систему в форме (1.7), но там приведены матрицы. На стр. 94 в начале главы 3 указаны ссылки (3.28), (3.30) на систему, которая дана в середине главы 3; на стр. 145 главы 4 указаны ссылки (5.74), (5.76) на формулы из 5 главы. Непонятно зачем называть дискретную линейную систему обыкновенной?

7. В качестве пожелания было бы интересно рассмотреть возможности предлагаемого подхода для получения оценок состояния рассматриваемых классов детерминированных линейных дискретных систем при их возбуждении случайной последовательностью с заданным уровнем средней анизотропии.

Указанные недостатки не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

**Заключение.** Диссертация Белова Алексея Анатольевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее значительное теоретическое и практическое значения в теории автоматического управления. Диссертационная работа Белова А.А. «Методы и алгоритмы анизотропного управления линейными дескрипторными и параметрически неопределенными системами» соответствует пункту 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней и отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что Белов Алексей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.01 системный

анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации).

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Автоматика и управление»,

ФГБОУ ВО КНИТУ-КАИ, доктор

физико-математических наук, профессор Маликов /Маликов А.И./

« 22 » августа 2022 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», 420111, респ. Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

Адрес в сети Интернет: <https://kai.ru/>

Тел. +7(917)232-24-23

Эл. почта: [a\\_i\\_malikov@mail.ru](mailto:a_i_malikov@mail.ru)

Подпись Маликова А.И.  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля  
Григорьев 22.08.2022

