



НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ
(создан приказом ректора МГУ им. М.В. Ломоносова
№ 698 от 25 сентября 2007 г.)

Председатель совета: **Садовничий В.А.**, академик РАН, ректор
МГУ имени М.В. Ломоносова

Зам. Председателя совета: **Салецкий А.М.**, профессор, дирек-
тор дирекции инновационных проектов 2006–2007 гг.
МГУ имени М.В. Ломоносова

Члены совета:

Антипенко Э.Е., профессор, проректор МГУ;

Вржещ П.В., профессор, проректор МГУ;

Семин Н.В., проректор МГУ;

Зинченко Ю.П., профессор, декан факультета психологии МГУ;

Касимов Н.С., чл.-корр. РАН, декан географического факультета
МГУ;

Кирпичников М.П., академик РАН, декан биологического фа-
культета МГУ;

Колесов В.П., профессор, декан экономического факультета
МГУ;

Лунин В.В., академик РАН, декан химического факультета МГУ;

Мионов В.В., профессор, проректор МГУ;

Михалев А.В., профессор, проректор МГУ;

Моисеев Е.И., академик РАН, декан факультета вычислительной
математики и кибернетики МГУ;

Пушаровский Д.Ю., чл.-корр. РАН, декан геологического фа-
культета МГУ;

Ткачук В.А., академик РАМН, декан факультета фундамен-
тальной медицины МГУ;

Третьяков Ю.Д., академик РАН, декан факультета наук о мате-
риалах МГУ;

Трухин В.И., профессор, декан физического факультета МГУ

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Серия «Инновационный Университет»

**ИННОВАЦИОННЫЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ
В ОБЛАСТИ НАВИГАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЯ В КОСМОСЕ**

Под редакцией
В.В. Александрова, Н.А. Парусникова



Издательство Московского университета

2007

УДК 378.1; 531/534

ББК 74.58; 39.67

И66

Серия «Инновационный Университет»

Инновационные образовательные программы
И66 **в области навигации и управления в космосе** / Под ред.
В.В. Александрова, Н.А. Парусникова. – М.: Изд-во МГУ,
2007. – 110 с.

ISBN 978-5-211-05491-2

Издание выполнено в рамках реализации национального проекта «Формирование системы инновационного образования в МГУ им. М.В. Ломоносова» (2006–2007 гг.). В настоящем издании представлены новые образовательные программы и материалы в области навигации и управления в космосе, разработанные на механико-математическом факультете в рамках проекта по формированию системы инновационного образования в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Разработанные программы включают в себя теоретическую и практическую части.

*Серия издается по решению Редакционного совета
Издательства Московского университета*

ISBN 978-5-211-05491-2 © Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
АКТУАЛЬНОСТЬ	9
ВОСТРЕБОВАННОСТЬ	10
УСЛОВИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ.....	12
ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ	13
СОСТАВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ	14
Базовые курсы «Методы анализа и синтеза».....	14
Специальные курсы.....	14
<i>Навигационные алгоритмы</i>	15
<i>Алгоритмы управления</i>	16
<i>Персональная навигация и полуавтоматическое управление</i>	17
Практикум	17
Итоговая аттестация магистра	19
УЧЕБНЫЕ ПРОГРАММЫ КУРСОВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ	21
ОПИСАНИЕ ПРАКТИКУМОВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ	91
Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo	91

Оптимальное управление возмущаемой системой	94
Тестирование качества управления аэрокосмическими объектами	99
КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ.....	101
ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ПРОГРАММЫ	106
ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ	109

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью проекта «Навигация и управление в космосе» являлось создание инновационной образовательной магистерской программы «Алгоритмы и математические методы навигации и управления аэрокосмическими объектами и их приложения».

Магистерская программа разработана с целью подготовки специалистов высшей квалификации для предприятий космической и авиационной промышленности. В первую очередь речь идет о специалистах научно-производственных компаний, специализированных конструкторских бюро – разработчиках современных интегрированных навигационных комплексов, систем управления подвижными объектами и персональной навигации. Другая часть потенциальных обучающихся по данной программе – сотрудники научных, производственных и учебных заведений, выпускники университетов, желающие повысить свой образовательный уровень в указанных областях знаний.

Необходимость подготовки магистерской программы «Алгоритмы и математические методы навигации и управления аэрокосмическими объектами и их приложения» обусловлена вновь возросшим интересом к исследованиям в данной области в России.

Программа сочетает в себе фундаментальность университетского образования и актуальность для современных приложений в области высоких технологий. Она является полностью новой и не имеет аналогов ни в России, ни за рубежом.

Программа разработана сотрудниками кафедры прикладной механики и управления, лаборатории управления и навигации, лаборатории математического обеспечения имитационных динамических систем (МОИДС) механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Руководитель проекта по созданию магистерской программы – заведующий кафедрой прикладной механики и управления, заведующий лабораторией МОИДС профессор В.В. Александров.

Проект «Навигация и управление в космосе» начался в феврале 2007 года. За неполный год проделана следующая работа: разработана структура магистерской программы; сформирован

перечень курсов и практикумов, составляющих программу; разработаны инновационные курсы; доработаны уже существующие курсы (в соответствии с направлением программы); созданы циклы практических занятий; подготовлены к печати научно-методические и учебные пособия; сформирован перечень тем для магистерской диссертационной работы; закуплено оборудование и программное обеспечение для практических работ, сопровождающих изучение магистерской программы.

В настоящее время на механико-математическом факультете формируется учебный план магистерской программы. Введение программы в учебный процесс планируется в сентябре 2008 года, после утверждения в установленном порядке на ученом совете.

Для апробации многие из спецкурсов, созданных в рамках разработки инновационной магистерской программы, читаются для иностранных специалистов, проходящих обучение в магистратуре механико-математического факультета МГУ. Среди них магистранты из Италии, Мексики, Китая, Ирана.

АКТУАЛЬНОСТЬ

«Транспортные, авиационные и космические системы» – это сфера исследований, принадлежащая к научным направлениям, которые определены Президентом Российской Федерации как «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации».

В настоящее время на специализированных предприятиях нашей страны, занимающихся проектированием навигационных систем и систем управления такими объектами, как самолеты, крылатые ракеты, подводные лодки и т.д., наблюдается заметное оживление. С другой стороны, имеет место острейшая нехватка специалистов высокой и высшей квалификации указанного профиля. Старые кадры практически выбыли по возрасту, молодые немногочисленны и к тому же не всегда получили должное образование. Руководство этих предприятий хорошо осознает указанное обстоятельство и пытается найти выход из создавшейся ситуации двумя способами: размещением заказов на выполнение соответствующих работ в ВУЗах (примером может являться наша кафедра) и организацией на своих предприятиях курсов обучения разной формы и уровня.

Сотрудники кафедры прикладной механики и управления и примыкающих к ней исследовательских лабораторий хорошо знакомы с самыми современными технологиями в области проектирования вычислительно-математических комплексов, составляющих основу систем навигации и управления, имеют большой практический опыт проектирования, тесно связаны с предприятиями названной выше специализации и хорошо информированы о состоянии дел на этих предприятиях. Кроме того, кафедрой накоплен богатый опыт в организации специализированных курсов и разработаны соответствующие методики преподавания.

ВОСТРЕБОВАННОСТЬ

В рамках разработки инновационной магистерской программы «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами» сотрудниками кафедры прикладной механики и управления, лаборатории управления и навигации механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова был доработан созданный ранее курс лекций по теме «Инерциально-спутниковые информационные технологии и их приложения». Курс лекций состоит в основном из спецкурсов по навигационной тематике и алгоритмам управления. Тематика лекций охватывает элементы современной теории оценивания и управления, теорию спутниковой навигации (системы ГЛОНАСС и GPS), теорию инерциальной навигации, теорию корректируемых навигационных систем и их приложения.

С 2006 года этот курс читается для сотрудников РПКБ – Раменского приборостроительного конструкторского бюро (более 40 слушателей) и МИЭА – Московского института электромеханики и автоматики (более 30 слушателей). РПКБ ФНПЦ – один из ведущих в России разработчиков бортового радиоэлектронного оборудования для самолетов, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов, объектов космического назначения, морских и наземных транспортных средств.

С 2007 года обновленный курс лекций по теме «Инерциально-спутниковые информационные технологии и их приложения» читается для специалистов ПНППК – Пермской научно-производственной приборостроительной компании (более 30 слушателей). ПНППК имеет 50-летний опыт разработки и производства навигационных систем различного назначения и товаров народного потребления. Важнейшими направлениями ее деятельности являются: авиационное приборостроение, морская навигация. За прошедшие годы ПНППК прошла путь от выпуска простейших датчиков и элементов дистанционных передач до сложных бортовых комплексов летательных аппаратов.

Изделия РПКБ и ПНППК используются более чем на 30 типах самолетов известнейших авиационных фирм России. Среди них самые современные самолеты четвертого поколения: МиГ-29, Су-27, Су-30.

Курс лекций «Инерциально-спутниковые информационные технологии и их приложения» постоянно модифицируется, в особенности раздел «Приложения». Этот раздел пополняется методиками решения актуальных задач, которые перед сотрудниками кафедры и лаборатории ставят заказчики из научно-производственных предприятий авиационной и космической промышленности.

Заинтересованность в подготовке специалистов по инновационной магистерской программе «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами» также высказывают представители других российских научно-исследовательских институтов и предприятий: Институт медико-биологических проблем РАН, Центр подготовки космонавтов имени Ю.А.Гагарина, Институт военной медицины МО РФ, Московская медицинская академия имени И.М.Сеченова, научно-производственные объединения «Молния», «Ротор», «Полет», Центральный аэрогидродинамический институт имени Н.Е. Жуковского.

УСЛОВИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ

Человек, желающий освоить магистерскую программу «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами», должен иметь высшее профессиональное образование определенной степени, подтвержденное документом государственного образца.

Зачисление на магистерскую программу происходит на конкурсной основе, при наличии диплома бакалавра по направлениям:

510300 – Механика,

511300 – Механика. Прикладная математика,

510100 – Математика,

511200 – Математика. Прикладная математика,

510200 – Прикладная математика и информатика.

Условия конкурсного отбора определяются МГУ им М.В. Ломоносова на основе Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования бакалавра по данному направлению.

В том случае, если профиль высшего образования поступающего в магистратуру не входит в вышеуказанный перечень, допуск к конкурсному отбору происходит после успешной сдачи экзаменов по дисциплинам, необходимым для освоения программы магистра и предусмотренным Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования бакалавра по данному направлению.

ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ

После обучения магистерской программе «Алгоритмы и математические методы навигации и управления аэрокосмическими объектами и их приложения» выпускнику присваивается степень **Магистр механики**. На механико-математическом факультете формируется пакет документов, необходимых для рассмотрения вопроса о создании нового профиля «**Навигация и управление в Космосе и на Земле**» направления **510300 – Механика**.

Объектами профессиональной деятельности магистра являются научно-исследовательские центры, органы управления, образовательные учреждения, промышленное производство. Магистр подготовлен к выполнению самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области навигации и управления в Космосе и на Земле, к созданию и использованию математических моделей процессов и объектов, к разработке эффективных методов решения задач навигации и управления, программно-информационному обеспечению научно-исследовательской и проектно-конструкторской деятельностью, преподаванию цикла механических, математических и компьютерных дисциплин.

Магистр обладает следующими умениями:

- ✓ формулировать и решать задачи, возникающие в ходе научно-исследовательской деятельности и требующие углубленных профессиональных знаний;
- ✓ выбирать необходимые методы исследования, модифицировать существующие и разрабатывать новые методы исходя из конкретных задач;
- ✓ обрабатывать полученные результаты, анализировать и осмысливать их с учетом имеющихся научных публикаций;
- ✓ вести библиографическую работу с привлечением современных электронных библиотек, каталогов и поисковых систем Интернет;
- ✓ представлять итоги проделанной работы в виде отчетов, рефератов, статей, оформленных в соответствии с имеющимися требованиями, с привлечением современных средств редактирования и печати.

СОСТАВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ

Обучение магистерской программе состоит из четырех этапов: изучение базовых курсов из цикла «Методы анализа и синтеза»; изучение специальных курсов из циклов «Навигационные алгоритмы», «Алгоритмы управления», «Персональная навигация и полуавтоматическое управление»; выполнение практикумов; выполнение и защита магистерской диссертации.

Базовые курсы «Методы анализа и синтеза»

Базовые курсы представляют собой годовые курсы фундаментального характера:

- ✓ Основы небесной и аналитической механики (автор – профессор Ю.Г. Мартыненко).
- ✓ Устойчивость и стабилизация движения аэрокосмических систем (автор – профессор В.М. Морозов).
- ✓ Основы инерциальной и спутниковой навигации (автор – профессор Н.А. Парусников).
- ✓ Прикладная теория управления и оценивания (автор – профессор Ю.В. Болотин).
- ✓ Фракционный анализ (автор – И.В. Новожилов).

Базовые курсы читаются на механико-математическом факультете более десяти лет. Содержание этих курсов постоянно пополняется и модифицируется в соответствии с современными научными достижениями и требованиями практики. Цель базовых курсов – дать фундаментальное образование, необходимое для освоения программ специальных курсов.

Специальные курсы

Специальные курсы призваны дать углубленные знания по отдельным вопросам навигации и управления в космосе. У магистранта есть широкий выбор полугодовых спецкурсов по следующим разделам: навигационные алгоритмы; алгоритмы управления; персональная навигация и полуавтоматическое управление.

Специальные курсы направлены на обучение эффективным методам исследования задач навигации, управления и оценивания, приложению этих методов к задачам инерциальной, спутни-

ковой и персональной навигации, авиационной гравиметрии, биомеханики, робототехники. Структура предлагаемых курсов во многом определяется опытом многолетнего сотрудничества сотрудников кафедры прикладной механики и управления, лаборатории управления и навигации механико-математического факультета МГУ с ведущими российскими компаниями, занимающимися разработкой интегрированных навигационных комплексов и систем управления подвижными объектами.

Навигационные алгоритмы

Инерциальные навигационные системы предназначены для определения координат движущихся объектов. Метод инерциальной навигации основан на уравнениях классической механики, при этом в качестве первичной информации используются измерения ньютонометров (датчиков удельной силы, акселерометров) и гироскопов. Никакой внешней информации при этом не используется, что является преимуществом инерциальных навигационных систем и причиной их широкого использования на движущихся объектах (самолетах, подводных и надводных кораблях, наземных экипажах). Данный раздел включает спецкурсы:

- ✓ Механика навигационных приборов (автор – доцент В.В. Тихомиров).
- ✓ Теория оптимального оценивания (автор – профессор Н.А. Парусников).
- ✓ Теория инерциальных навигационных систем (автор – профессор Н.А. Парусников).
- ✓ Теория спутниковых навигационных систем (системы ГЛОНАСС и GPS). Стандартный, дифференциальный, относительный режимы (авторы – д.ф.-м.н. А.А. Голован, к.ф.-м.н. Н.Б. Вавилова).
- ✓ Навигационные приложения теории оптимального оценивания (задачи калибровки чувствительных элементов навигационных систем; задачи выставки инерциальных систем на неподвижном и подвижном основаниях; задачи интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем, тесно и слабосвязанные системы; задача топопривязки) (авторы – профессор Н.А. Парусников, д.ф.-м.н. А.А. Голован).

- ✓ Корреляционная теория стационарных случайных процессов и методы определения их характеристик (автор – профессор Н.А. Парусников).
- ✓ Математические методы задачи аэрогравиметрии (автор – профессор Ю.В. Болотин).
- ✓ Гарантирующее оценивание в задачах навигации (автор – д.ф.-м.н. А.И. Матасов).

Алгоритмы управления

В этом разделе рассматриваются современные подходы к задачам оптимального управления, в частности редукция задач оптимального управления к геометрическим задачам, доказательства принципа максимума Понтрягина при наличии ограничений с использованием теоремы отделимости выпуклых множеств. Рассмотрены вопросы существования оптимальных управлений при смешанных ограничениях, а также необходимые условия оптимальности для минимаксных задач, существование chattering стратегии оптимального управления при соединении особого участка траектории с регулярным участком. Рассмотрены аномальные ситуации в оптимальном управлении. Данный раздел включает спецкурсы:

- ✓ Функциональный анализ и оптимальное управление движением (автор – профессор В.В. Александров).
- ✓ Алгоритмы численного решения задач оптимального управления и оценивания (автор – д.ф.-м.н. С.С. Лемак).
- ✓ Максимальное тестирование качества стабилизации управляемых движений (автор – профессор В.В. Александров).
- ✓ Компьютерный анализ управляемых механических систем (автор – доцент П.А. Кручинин).
- ✓ Системы стабилизации углового движения искусственных спутников Земли (автор – к.ф.-м.н. Д.И. Бугров).
- ✓ Управление мобильными роботами (автор – к.ф.-м.н. В.М. Буданов).
- ✓ Нестационарные динамические системы в задачах навигации и управления (автор – профессор В.М. Морозов).
- ✓ Математическое моделирование управляемых систем (методы малого параметра в задачах навигации и управления)

движущимися объектами) (авторы – профессор И.В. Новожилов, к.ф.-м.н. А.В. Влахова).

- ✓ Методы робастного управления (автор – доцент П.А. Кручинин).

Персональная навигация и полуавтоматическое управление

В курсах данного раздела раскрываются механизмы вредного воздействия на организм человека таких факторов авиа- или космического полета, как перегрузки и невесомость, изменение атмосферного давления и кислородного состава воздуха, особенности работы вестибулярной, зрительной, кровеносной систем в условиях полета.

В курсах изучаются математические модели вестибулярных рецепторов человека или животного, их взаимодействие, центральная обработка информации, математические модели скелетных мышц и межсистемных взаимодействий.

Рассматриваются современные возможности и перспективы коррекции вестибулярной функции. Детально освещается одно из главных направлений современных исследований в этой области, связанное с использованием микроэлектромеханических систем (МЭМС). Данный раздел включает спецкурсы:

- ✓ Введение в персональную навигацию (авторы – профессор В.В. Александров, с.н.с. Т.Б. Александрова).
- ✓ Математические модели датчиков вестибулярной системы (автор – доцент Н.В. Куликовская).
- ✓ Реакции человека на физические факторы авиационных и космических полетов (автор – к.ф.-м.н. А.Г. Якушев).

Практикум

Важную роль в системе подготовки магистров-механиков играют практикумы, призванные выработать практические навыки по анализу, синтезу систем управления, работе с навигационными приборами. Практикум включает следующие циклы:

- ✓ Оптимальное управление возмущаемой системой.
- ✓ Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo.
- ✓ Тестирование качества управления аэрокосмическими объектами.

Конструирование современных систем управления и навигации невозможно без применения вычислительной техники. Только с помощью компьютера, установленного на борту движущегося объекта и позволяющего в реальном времени обрабатывать информацию, поступающую от измерительных устройств, стало возможно формировать оптимальные алгоритмы управления движением.

В целях подготовки новых механических практикумов в рамках инновационного образовательного проекта, было закуплено инерциальное и спутниковое навигационное оборудование, высокоточные гироскопы и акселерометры типа МЭМС, вычислительная техника и программное обеспечение.

Навигационное оборудование используется в задачах практикума «Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo». В дальнейшем планируется расширить спектр задач данного практикума.

Высокоточные гироскопы и акселерометры типа МЭМС планируется использовать в задачах практикумов «Оптимальное управление возмущаемой системой» и «Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo».

Для создания компьютерной системы тестирования по курсам магистерской программы и компьютерных практикумов «Оптимальное управление возмущаемой системой», «Тестирование качества управления аэрокосмическими объектами» с возможностью дистанционной работы закуплены сервер на базе 4-х ядерного процессора Intel® Core™ 2 Quad Q6700 и шлем виртуальной реальности. В задаче управления процессом сближения космического модуля с орбитальной станцией для повышения качества визуальной имитации используются шлемы виртуальной реальности и специальный поляризационный экран, позволяющий создать иллюзию объемного изображения. В состав практикума входит костюм – скафандр с регулируемым давлением воздуха в нижней половине. Это позволяет имитировать для космонавта-оператора условия, близкие к условиям управления объектом на орбите.

Базовые и специальные курсы содержат задачи, которые необходимо решать с использованием специальных математических пакетов – MATLAB, Mathematica, Maple. Для сопровожде-

ния курсов были закуплены последние версии этих программных продуктов по академической лицензии.

В рамках создания программного обеспечения для практикума «Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo» закуплена система разработки Microsoft Visual Studio Professional.

Практикум выполняется на первом году обучения в магистратуре.

Итоговая аттестация магистра

Итоговая государственная аттестация магистра включает защиту выпускной магистерской работы (магистерской диссертации) и государственные экзамены, устанавливаемые в соответствии с требованиями учебно-методического объединения.

Магистерская работа выполняется на втором году обучения и является завершающим этапом высшего профессионального образования. Она обеспечивает закрепление высокого уровня академической культуры, овладение методологическими представлениями и методическими навыками в профессиональной деятельности в области «Навигации и управления в Космосе и на Земле».

Основной целью магистерской работы является закрепление и углубление теоретических знаний по профильным дисциплинам, а также приобретение практических навыков в научно-исследовательской деятельности.

Выпускная работа может быть реализована в одной из следующих форм:

- ✓ самостоятельное научное исследование;
- ✓ научный реферат по современным проблемам навигации и управления;
- ✓ работа прикладного характера, содержащая математическую модель, алгоритм решения и программную реализацию.

При проведении оценки магистерской работы возможно привлечение в качестве рецензентов специалистов из других ВУЗов или соответствующих профилю обучения научно-исследовательских институтов.

В рамках реализации инновационного образовательного проекта «Разработка методического и программного обеспечения для магистерской программы «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами» подготовлен ряд тем для магистерских работ по следующим направлениям:

- ✓ Инерциальная навигация и спутниковые навигационные системы.
- ✓ Авиационная гравиметрия.
- ✓ Персональная навигация.
- ✓ Максимальное тестирование управления космическими системами
- ✓ Механика вестибулярного аппарата.

УЧЕБНЫЕ ПРОГРАММЫ КУРСОВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ

В данном разделе приводятся учебные планы, программы и описания некоторых курсов, формирующих магистерскую программу «Алгоритмы и математические методы навигации и управления аэрокосмическими объектами и их приложения».

Учебная программа базового курса **Основы аналитической и небесной механики**

Автор – профессор Ю.Г. Мартыненко.
Количество кредитов – 8.

Обеспечиваемые компетенции

Изучение данного курса обеспечивает магистранта необходимым минимумом фундаментальных знаний, на базе которых будущий специалист сможет самостоятельно овладевать всем новым, с чем ему придется столкнуться в ходе дальнейшего научно-технического прогресса. Магистрант, изучивший курс, знает основные научные понятия и термины, используемые в настоящее время при анализе математических моделей движения механических систем; владеет искусством составления механико-математических моделей движения материальной точки, абсолютно твердого тела и системы твердых тел; имеет представление о задачах оптимизации параметров изучаемых систем; имеет опыт решения и анализа построенных математических моделей.

Цель курса – изучение и последующее применение методов построения и анализа математических моделей движения твердого тела, системы твердых тел.

Задачи курса

Дать магистранту представление об основных понятиях и методах аналитической механики, об основных понятиях и методах гамильтоновой механики, об основных понятиях систем переменного состава. Изложить основы механики космических полетов.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс является базовым. Его успешное освоение необходимо для дальнейшего изучения магистерской программы.

1. Введение

Предмет и задачи дисциплины. Краткий исторический обзор направлений развития динамики механических систем. Место методов аналитической и небесной механики в математическом моделировании движения небесных и искусственных тел. **2 часа.**

2. Лекционные занятия

Тема 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Раздел 1. Теорема об изменении кинетической энергии в дифференциальной и интегральной формах. Теорема о сохранении механической энергии в консервативной системе. Область возможности движения. «Потенциальная яма». Классификация связей, возможные и действительные перемещения. Идеальные связи. Проблема замыкания уравнений Ньютона для систем со связями. Принцип Даламбера-Лагранжа. Общее уравнение динамики. **4 часа.**

Раздел 2. Аналитическая статика. Принцип возможных перемещений. Случай потенциальных сил. Обобщенные координаты. Число степеней свободы механической системы. Конфигурационное пространство. Обобщенные силы. Условия равновесия механических систем в обобщенных координатах. Устойчивость положения равновесия механических систем. Теорема Лагранжа – Дирихле. Критерий Сильвестра. **4 часа.**

Раздел 3. Уравнения Лагранжа второго рода в обобщенных координатах (вывод). Матричная форма записи уравнений Лагранжа. Структура кинетической энергии и уравнений Лагранжа второго рода. Уравнения Лагранжа второго рода для консервативных механических систем. Функция Лагранжа. Движение релятивистской частицы в потенциальном силовом поле. Уравнения Лагранжа в избыточном наборе переменных. Обобщенный интеграл энергии для систем с нестационарными связями – интеграл Якоби. Влияние сил трения на

движение механических систем. Диссипативная функция Релея и ее механический смысл. **4 часа.**

Раздел 4. Теория малых колебаний вблизи положения равновесия. Циклические координаты, стационарные движения и малые колебания в окрестности стационарных движений. Основы теории устойчивости движения. Теорема Лагранжа – Дирихле. **4 часа.**

Раздел 5. Определение пондеромоторных сил в электромеханических системах. Уравнения Лагранжа-Максвелла для электромеханических систем. Электромеханическая аналогия – «сила – напряжение». Электромагнитный подвес твердого тела. **4 часа.**

Раздел 6. Применение уравнений Лагранжа в механике относительного движения. Обобщенная силовая функция. Функция Лагранжа заряженной частицы в электромагнитном поле. Движение заряженной частицы в постоянном магнитном поле. Циклотронная частота. Применение уравнений Лагранжа для анализа ударных явлений. Удар диска о поверхность. **4 часа.**

Тема 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ ГАМИЛЬТОНОВОЙ МЕХАНИКИ

Раздел 7. Гамильтонова механика. Канонические уравнения Гамильтона. Механический смысл функции Гамильтона. Принцип Гамильтона – Остроградского для консервативных механических систем. **4 часа.**

Раздел 8. Теория канонических преобразований. Метод Якоби интегрирования канонических уравнений. Интегральные вариационные принципы и инварианты классической механики. Основы теории возмущений. **4 часа.**

Тема 3. ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Раздел 9. Динамика твердого тела. Векторно-матричное задание движения твердого тела. Определение вектора скорости в криволинейных координатах. Параметры Ламе. Задача о сближении движущихся точек. Распределение скоростей в твердом теле. Независимость угловой скорости от выбора полюса. Плоское движение твердого тела. Мгновенный центр скоростей. Скорость и ускорение точки в сложном движении (теорема Кориолиса). Сложение движений твердого тела.

Углы Эйлера и теорема Эйлера. Кинематические уравнения Эйлера. **4 часа.**

Раздел 10. Теория конечных поворотов и формула Родрига. Параметры Родрига-Гамильтона. Сложение и вычитание конечных поворотов. Выражение вектора угловой скорости через вектор конечного поворота. Матричные действия при перепроектировке векторов. Свойства матрицы направляющих косинусов. Кинематические уравнения Пуассона. Выражение матрицы направляющих косинусов через параметры Родрига-Гамильтона. Кинематические уравнения для параметров Родрига – Гамильтона. Задание произвольного движения твердого тела. Однородные координаты. Кинематические инварианты. Кинематический винт. **6 часов.**

Раздел 11. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси. Динамические реакции в подшипниках вращающегося тела. Фазовая плоскость физического маятника. Сведения из теории эллиптических интегралов и эллиптических функций Якоби. Интегрирование уравнений движения маятника. **4 часа.**

Раздел 12. Движения твердого тела вокруг неподвижной точки. Различные формы уравнений движения твердого тела (уравнения Эйлера, уравнения в оскулирующих переменных). Случаи интегрирования тяжелого твердого тела. Интегрирование уравнений в случае Эйлера. Геометрическая интерпретация Пуансо. Определение ориентации твердого тела в абсолютном пространстве при движении Эйлера-Пуансо. Быстровращающееся твердое тела. Гироскопические эффекты. Твердое тело с маховиками. Движение гиростата. Движение свободного твердого тела. Дифференциальные уравнения движения свободного твердого тела. Влияние сил сопротивления на движение твердого тела. **8 часов.**

Тема 4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Раздел 13. Динамика системы переменного состава. Теорема об изменении количества и момента количества движения. Дифференциальные уравнения движения. Движение ракеты вне поля сил. Вертикальное движение ракеты в однородном поле тяжести. **4 часа.**

Тема 5. МЕХАНИКА КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Раздел 14. Механика космического полета. Дифференциальные уравнения движения точки в неинерциальной системе координат. Силы инерции. Зависимость веса тела от широты места. Невесомость. Идея метода инерциальной навигации. Уравнения движения задачи двух тел. Интеграл площадей. Второй закон Кеплера. Формулы Бине. Уравнение орбиты. Зависимость типа орбиты от начальной угловой скорости (первая и вторая космическая скорости). Время в кеплеровом движении. Определение ориентации кеплеровой орбиты в инерциальном пространстве. **4 часа.**

Раздел 15. Постановка задачи трех и более тел. Движение твердого тела в центральном ньютоновском гравитационном поле. Главный вектор сил тяготения. Гравитационный момент. Уравнение движения тела относительно центра масс. Относительное равновесие твердого тела на круговой орбите. Плоские движения. о поступательно-вращательном движении гравитирующих твердых тел. **4 часа.**

Раздел 16. Движение намагниченного твердого тела в магнитном поле Земли. Модели прямого и косоугольного диполя для описания геомагнитного поля Земли. Влияние вихревых токов на стабилизацию искусственного спутника Земли. – **4 часа.**

Тема 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

1. Определение главных форм колебаний связанных консервативных систем. Свойства собственных форм. **4 часа.**

2. Динамический гаситель колебаний. **4 часа.**

3. Определение времени демпфирования нутационных колебания спутника. **2 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен, зачеты по практическим занятиям.

4. Рекомендуемая литература

Основная:

Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. – М.: Наука, 1966.

Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. – М.: Наука, 1971.

Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1961.

Маркеев А.П. Теоретическая механика. М.: ЧеРо, 1999, 572 с.

Мартыненко Ю.Г. Аналитическая динамика электромеханических систем. М.: МЭИ, 1985.

Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1972.

Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М., Наука, 1965.

Мартыненко Ю.Г. Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1988, 368 с.

Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М., Наука, 1974.

Мартыненко Ю.Г. Об одной форме уравнений движения симметричного твердого тела около неподвижной точки, Сборник научно-методических статей по теоретической механике, № 26. Изд-во МГУ, 2005, с. 86-101.

Дополнительная:

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968.

2. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1972.

Инновационная учебная программа базового курса
Прикладная теория управления

Автор – профессор Ю.В. Болотин.
Количество кредитов – 10.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать основные методы прикладной теории управления. Он должен владеть ключевыми понятиями теории управления – понятиями управляемого объекта, управляющих механизмов, сенсоров, обратной связи, устойчивости и стабилизации. Магистрант должен владеть понятиями сигнала и шума, основными принципами цифровой и аналоговой обработки данных в системах управления, уметь проектировать цифровые фильтры в системах управления с учетом характеристик сигналов и погрешностей. Магистрант должен освоить понятие обратной связи по измерениям, уметь проверять наблюдаемость, управляемость и стабилизируемость задачи. Он должен знать основные методы анализа устойчивости и уметь пользоваться ими на практике. Он должен быть знаком с понятиями параметрической и системной неопределенности, робастного управления.

Цель курса – получение и последующее применение студентами ключевых представлений и методологических подходов теории управления.

Задачи курса

Дать магистранту представления об основных принципах теории управления. Ввести понятие управляемой системы как совокупности движущегося объекта, сенсоров, приводов и собственно алгоритма управления. Сформулировать основные критерии качества управления – устойчивость, точность, экономичность. Ввести понятие внешних возмущений как факторов, противодействующих задаче управления, и понятие робастности как свойства алгоритма управления сопротивляться этим внешним воздействиям. Ввести разделение задачи управления на задачи оценивания состояния по результатам измерений и собственно управления.

Научить магистранта проводить анализ входных сигналов системы управления, проводить идентификацию их моделей и формирующих фильтров, включать эти модели в общую структуру системы управления.

Дать магистранту необходимые знания и навыки для самостоятельной постановки, анализа и решения различных прикладных задач управления и навигации.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс относится к фундаментальной подготовке магистранта и является основой для большинства других курсов магистерской программы. Для его освоения необходимы знания основ дифференциального и интегрального исчисления, функционального анализа, теории функций комплексного переменного. Понятия и результаты курса используются в курсах «Робастное управление», «Инерциальная навигация», «Авиационная гравиметрия» и др. Ряд задач практикума – «Спутниковая навигация», «Управление возмущаемой системой» и др. можно рассматривать как практические занятия по методам и подходам, изложенным в данном курсе.

1. Введение – 2 часа

Предмет и задачи дисциплины. Роль дисциплины в управлении космическими ракетами и спутниками. Связь со смежными дисциплинами: теорией экстремальных задач, теорией оценивания, механикой.

2. Лекционные занятия

Тема 1. КОНЕЧНОМЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ

Раздел 1. Факторизация матриц – QR, SVD – разложения. Понятие числа обусловленности матрицы как меры точности ее обращения. **2 часа.**

Раздел 2. Понятие измерения и шума. Метод наименьших квадратов, решение методами SVD, QR – разложения матриц. **2 часа.**

Раздел 3. Метод расширенных наименьших квадратов. Сведение к задаче о наименьшей норме матрицы возмущения. Пример – навигация с использованием СНС. **4 часа.**

Раздел 4. Метод наименьших модулей, сведение задачи к линейному программированию и итерационному МНК (метод Вейсфельда). Робастность МНМ. **2 часа.**

Тема 2. СИГНАЛЫ И ФИЛЬТРЫ

Раздел 5. Понятие сигнала. Его разложение на полезную составляющую и шум. Определение цифрового фильтра. БИХ и КИХ – фильтры. Частотная характеристика фильтра. Связь с рядами Фурье. Элементарные фильтры – дифференцирование, интегрирование, взятие среднего, аperiodическое звено. Их частотные характеристики. Классические сглаживающие КИХ – фильтры -Ханна, Хэмминга. **4 часа.**

Раздел 6. Дискретное и непрерывное преобразование Фурье. Задача построения фильтра с заданными частотными свойствами. Эффект Гиббса. Сглаживание Ланцоша. Дискретизация измерений, маскировка частот. Теорема Котельникова. Изменение частоты дискретизации сигнала. **2 часа.**

Раздел 7. БИХ – фильтры. Дискретное и непрерывное преобразование Лапласа. Устойчивость фильтра. Билинейное преобразование как метод трансформации фильтра. Фильтр Баттеворта в непрерывном и дискретном времени как решение задачи наилучшей аппроксимации данных. **4 часа.**

Тема 3. ОЦЕНИВАНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Раздел 8. Задача оценивания в пространстве состояний. Асимптотический фильтр. Понятие запаса устойчивости по оцениванию. Наблюдаемость и детектируемость. **4 часа.**

Раздел 9. Дискретный фильтр Калмана. Его численная реализация посредством QR-разложения матриц. **2 часа.**

Раздел 10. Стационарные случайные процессы и их спектральное представление. Спектральный метод определения реакции линейной системы на случайное возмущение. Факторизация спектральной плотности. **4 часа.**

Раздел 11. Классические методы спектрального оценивания. Периодограммные оценки спектральной плотности. Параметрические методы спектрального оценивания случайных процессов. Построение формирующего фильтра авторегрессии методом наименьших квадратов. Сведение задачи оценивания

системы с небелыми шумами на входе к задаче Калмановской фильтрации. **6 часов.**

Тема 4. СТАБИЛИЗАЦИЯ

Раздел 12. Управляемая система, понятие обратной связи. Передаточная функция. Диаграммы Боде, Найквиста, Михайлова. Классический PID-регулятор. **4 часа.**

Раздел 13. Задача управления в пространстве состояний. Управляемость и стабилизируемость посредством обратной связи. Запас устойчивости по управлению. **4 часа.**

Раздел 14. Синтез оптимального управления в системе с квадратичным критерием качества. Совместная задача оценивания и управления. Теорема разделения. **4 часа.**

Тема 5. РОБАСТНОСТЬ

Раздел 15. Понятие робастности управления. Критерии робастности – запас по амплитуде и фазе. Формализация робастности как устойчивости при наличии неопределенного звена в цепи обратной связи. Теорема о малом коэффициенте усиления. **4 часа.**

Раздел 16. Критерий Н-бесконечность. Теорема о двух уравнениях Риккати. Связь с игровыми задачами. Интерпретация в частотной области. **4 часа.**

Раздел 17. Цифровые системы управления механическими системами. Влияние дискретизации на устойчивость и качество. Разрешение проблемы дискретизации методами робастного управления. **2 часа.**

Раздел 18. Понятие управляемости в линейных и нелинейных системах. Управляемость неголономных систем с неинтегрируемыми связями. Автомобиль. **6 часов.**

Тема 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.

1. Фильтрация сигналов различных датчиков – акселерометров, гироскопов, спутниковой навигационной системы. **10 часов.**
2. Идентификация модели струнного и маятникового гравиметров различными методами. **6 часов.**
3. Построение системы стабилизации для перевернутого маятника и платформы инерциальной навигационной системы. **6 часов.**

3. Методические рекомендации и пособия по изучению курса или дисциплины

1. Александров В. В., Болтянский В. Г., Лемак С. С., Парусников Н. А., Тихомиров В. М. Оптимизация динамики управляемых систем. Москва: Издательство МГУ, 2000.

2. Болотин Ю. В., Голован А. А., Парусников Н. А. Уравнения аэрогравиметрии. Алгоритмы и результаты испытаний. Москва: Издательство Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2002. 120 с.

4. Контрольные задания – экзамен, зачеты по задачам практикума.

5. Литература

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.

2. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимизация динамики управляемых систем. Москва: Издательство МГУ, 2000.

3. Хемминг. Цифровые фильтры. Москва, Мир. 1978.

4. Поляк Я.С. Робастное управление. Москва. Наука. 2003.

Инновационная учебная программа курса **Механика навигационных приборов**

Автор – доцент В.В. Тихомиров.
Количество кредитов – 4.

Обеспечиваемые компетенции

Магистрант должен освоить основные понятия теории инерциальной навигации. Должен быть знаком с основными датчиками, составляющими основу навигационных систем, знать принципы их функционирования. Магистрант должен уметь составлять уравнения идеальной работы и уравнения ошибок навигационных приборов.

Цели курса – ознакомить магистранта с принципами функционирования датчиков и приборов инерциальных навигационных систем.

Задачи курса

Дать магистранту представление об основных принципах инерциальной навигации, о типах навигационных датчиков, принципах и особенностях их функционирования.

Место курса в процессе подготовки магистра

Данный курс относится к спецкурсам навигационного направления магистерской программы. Изучение данного спецкурса необходимо для дальнейшего освоения навигационного направления.

1. Введение – 1 час

Понятие об инерциальной навигации. Метод инерциальной навигации. Устройство инерциальных навигационных систем. Датчики инерциальных навигационных систем.

2. Лекционные занятия

Тема 1. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ – ДАТЧИКИ ОРИЕНТАЦИИ

Раздел 1. Механические гироскопы. Гироскопы в кардановом подвесе. Прецессионные и нутационные уравнения. Модели инструментальных погрешностей гироскопа в кардановом подвесе. **2 часа.**

Раздел 2. Динамически настраиваемый гироскоп. Устройство. Уравнения движения. Условие динамической настройки. **2 часа.**

Раздел 3. Вибрационный гироскоп. **1 час.**

Тема 2. ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА

Раздел 4. Гиростабилизированная платформа. Уравнения движения в прецессионной постановке. Модели ошибок. **2 часа.**

Тема 3. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ – ДАТЧИКИ
УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Раздел 5. Двухстепенной гироскоп – датчик угловой скорости. Уравнения движения. **1 час.**

Раздел 6. Волоконно-оптический гироскоп. **2 часа.**

Раздел 7. Лазерный гироскоп. **2 часа.**

Тема 4. НЬТОНОМЕТРЫ (АКСЕЛЕРОМЕТРЫ) – ДАТЧИКИ
УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ

Раздел 8. Пространственный ньютонометр. Однокомпонентный ньютонометр. Маятниковый ньютонометр. **2 часа.**

Раздел 9. Гироскопический интегратор линейных ускорений. Уравнения движения. **2 часа.**

Раздел 10. Струнный гравиметр. **1 час.**

Тема 5. MEMS ДАТЧИКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Раздел 11. Микроэлектронные датчики инерциальных навигационных систем. **1 час.**

Тема 6. УСТРОЙСТВО ПЛАТФОРМЕННЫХ
ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Раздел 12. Устройство платформенных инерциальных навигационных систем. Устройство бескарданных инерциальных навигационных систем. **2 часа.**

Тема 7. КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Раздел 13. Модели погрешностей чувствительных элементов. Калибровка чувствительных элементов инерциальных нави-

гационных систем. Калибровка платформенных инерциальных навигационных систем. **2 часа.**

Раздел 14. Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем. **1 час.**

3. Практические занятия

1. Математическое моделирование задачи оценки постоянных составляющих дрейфа гироскопов и азимутальной ошибки инерциальной навигационной системы. – 6 часов.
2. Стендовая калибровка, построение алгоритма и программы обработки данных для оценки параметров гироскопов и датчиков угловой скорости бескарданной инерциальной навигационной системы. – 6 часов.
3. Математическое моделирование процесса калибровки и обработка данных для оценки параметров системы управления движением гироскопов инерциальной навигационной системы. – 6 часов.

4. Контрольные задания – экзамен, зачеты по задачам практикума.

5. Литература

1. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М. Наука.1976.
2. Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П. Лекции по теории гироскопов. М.Изд-во МГУ. 1983.
3. Брозгуль Л.И. Динамически настраиваемые гироскопы. М. Машиностроение. 1989.
4. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. М. Радио и связь. 1987.
5. Применения лазеров. Под ред. В.П. Тычинского. М. Мир, 1974.
6. Бакаляр А.И., Лукьянов Д.П. Основы теории лазерных кольцевых гироскопов. Ленинград. ЛВИКА им. А.Ф.Жуковского.1967.
7. Новожилов И.В. Фракционный анализ. М.Изд-во МГУ.1991.

Учебная программа курса
Теория оптимального оценивания

Автор – профессор Н.А. Парусников.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Результатом изучения курса служит освоение современных методов оптимального оценивания, таких, как методов калмановской фильтрации и сглаживания, методов наименьших модулей, методов гарантированного оценивания. Должны быть также освоены особенности программной реализации этих методов в различных модификациях. Магистрант должен иметь достаточно глубокие знания в прикладной теории анализа и синтеза систем, использующих частотные представления и спектральные разложения. Должны быть развиты навыки применения указанных методов к практическим задачам аэрокосмической навигации, авиагравиметрии и т.п.

Цель курса – подготовка специалистов широкого профиля, владеющих различными методами и имеющих представление о границах их применимости.

Задачи курса

Служить базой, на основе которой легко усваиваются опорные курсы специализации: теория инерциальных навигационных систем и комплексов и теория управления движущимися объектами.

Место курса в процессе подготовки магистра

Данный курс необходим для изучения специализированных курсов по навигации.

1. Введение – 2 часа

Краткий обзор истории развития теории оценивания. Применение теории оценивания в прикладных задачах инерциальной и спутниковой навигации.

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Постановка задачи оценивания. Характеристика алгоритмов оценивания: линейность, несмещенность, состоятельность, оптимальность (эффективность). Роль сходимости в среднеквадратичном при определении состоятельности алгоритма. Эвристический критерий оптимальности – критерий ортогональности. **2 часа.**

Раздел 2. Метод наименьших квадратов при решении переопределенной системы линейных уравнений. Геометрическая интерпретация. Вероятностная интерпретация. Расширение на случай коррелированности погрешностей измерений. Сингулярное разложение. Сингулярные числа как меры оцениваемости. Пример применения метода наименьших квадратов при решении задачи сплайнового сглаживания. Метод наименьших квадратов при отдельных точных измерениях. **4 часа.**

Раздел 3. Задача оценивания вектора состояния линейной динамической системы при помощи линейных измерений. Анализ наблюдаемости задачи. Асимптотические алгоритмы оценивания. Мера наблюдаемости. Собственные числа грамиана наблюдаемости как меры оцениваемости. **4 часа.**

Раздел 4. Общая постановка задачи оценивания. Критерий минимума дисперсии, критерий ортогональности, критерий условного среднего. Их эквивалентность при нормальном законе распределения. Частный случай линейной связи вектора измерения и оцениваемого вектора. Понятие об априорных и апостериорных оценках. **2 часа.**

Раздел 5. Задача оценивания вектора состояния линейной динамической системы при помощи линейных измерений в стохастической постановке. Дискретный фильтр Калмана. Метод корня фильтра Калмана. Численная реализация для треугольной формы. Задача сглаживания. Алгоритм оптимального сглаживания на фиксированном интервале: прямой и обратный фильтры. Алгоритм оптимального сглаживания в фиксированной точке. **6 часов.**

Раздел 6. Непрерывный фильтр Калмана. Различные формы представления уравнения Риккати, теоремы об устойчивости. **4 часа.**

Раздел 7. Стохастическая мера оцениваемости и редукция задачи оценивания. Анализ точности редукции задачи оценивания. **2 часа.**

Раздел 8. Обзор иных методов оценивания. **2 часа.**

4. Контрольные задания – экзамен.

5. Литература

1. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимальное управление движением. М: Физматлит, 2005.

2. Maybeck P.S. Stochastic Models, Estimation and Control. New-York: Academic Press, 1979.

Учебная программа курса
Теория инерциальных навигационных систем

Автор – профессор Н.А. Парусников.
Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

В результате изучения курса магистрант должен уметь сконструировать любой навигационный алгоритм по заданной первичной информации, обеспечивающий минимизацию выходной навигационной ошибки, описать более или менее адекватную модель входных инструментальных погрешностей и провести анализ точности навигационной системы, ранее разработанной на специализированном предприятии. Он должен также легко преобразовывать структурную схему системы, по которой задача коррекции решается как задача чистого оценивания, в эквивалентную структурную схему решения задачи в виде обратных связей. В более широком смысле он должен уметь осуществлять интеграцию различных информационных потоков. При этом им должны использоваться современный язык, терминология, интерпретация входной информации на правильном теоретико-механическом уровне, исключающем, как это иногда случается, двусмысленности в понимании задачи.

Цель курса – глубокое освоение современной теории навигационных систем.

Задачи курса

Подготовить магистранта к самостоятельной работе в области аэрокосмической навигационной техники.

Место курса в процессе подготовки магистра

Курс является одним из двух основных навигационных курсов, в которых используется как базовое содержание курсов по теории случайных процессов и теории оптимального оценивания.

1. Введение

Предмет и задачи дисциплины. Краткий исторический обзор развития инерциальной и спутниковой навигации. Перспективы развития инерциальных навигационных систем. Перспективы

развития спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo.

2. Лекционные занятия

Тема 1. ТЕОРИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Раздел 1. Метод инерциальной навигации. Инерциальное пространство и координаты. Объект и уравнения его движения. Приборный трехгранник. Автономная система инерциальной навигации. Навигационная модель формы Земли, поля тяготения. Географические координаты. Общие структуры модельных уравнений инерциальной навигационной системы (ИНС). **3 часа.**

Раздел 2. Основные чувствительные элементы ИНС. Акселерометры, датчики угловой скорости. Типовые модели инструментальных погрешностей. **1 час.**

Раздел 3. Модельные уравнения инерциальных навигационных систем. Модельные уравнения платформенных горизонтируемых ИНС с абсолютной или относительно свободной ориентацией в азимуте. Модельные уравнения бесплатформенной ИНС (БИНС). **2 часа.**

Раздел 4. Уравнения ошибок инерциальной навигации. Идеальный, приборный и модельный трехгранники. Векторы малого поворота. Динамические и кинематические ошибки ИНС и их свойства. Ошибки определения географической широты, долготы, азимутального угла, скоростные ошибки. Уравнения для угловых ошибок построения приборной вертикали. Шулеровские колебания. **4 часа.**

Тема 2. ЗАДАЧА КОРРЕКЦИИ В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Раздел 5. Схемы решения задачи коррекции. Задача коррекции как линейная задача оценивания вектора ошибок ИНС при помощи дополнительной измерительной информации. Задача коррекции как задача управления. Задача коррекции как комбинированная задача оценивания и управления. Информационная эквивалентность схем коррекции. **2 часа.**

Раздел 6. Примеры задач коррекции ИНС. Задача выставки ИНС на неподвижном основании как задача определения взаимной ориентации двух трехгранников. Задача торопривязки в рамках ZUPT (Zero Velocity Update Technology) технологии. Задача коррекции ИНС при помощи вторичной позиционной и скоростной спутниковой информации. **4 часа.**

Раздел 7. Задача коррекции ИНС в задаче авиационной гравиметрии. Основные приборные блоки авиационной гравиметрической системы и их характеристики. Гравиметры: маятниковые, струнные. Дифференциальная спутниковая навигационная система. Инерциальная навигационная система с горизонтируемой гироплатформой. Система регистрации и синхронизации. Гравитационные аномалии, отклонения вертикали. Постановка задачи векторной гравиметрии на подвижном основании. Основное гравиметрическое уравнение. Постановка задачи авиационной гравиметрии в приборных осях ИНС. Параметризация модели задачи авиационной гравиметрии по результатам решения задачи коррекции. **2 часа.**

Тема 3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕГРАЦИИ ИНС/СНС

Раздел 8. Задачи интеграции ИНС/СНС при помощи вторичной спутниковой информации. Модели задач коррекции ИНС. **2 часа.**

Раздел 9. Задачи интеграции ИНС/СНС при помощи первичной спутниковой информации. Стандартный и дифференциальный режим, кодовые, доплеровские, фазовые измерения. Модели коррекционных задач. **2 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Рекомендуемая литература

1. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. (Автономные системы). М.: Изд-во «Наука», 1966.
2. Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 1982.
3. Голован А.А., Горицкий А.Ю., Парусников Н.А., Тихомиров В.В. Алгоритмы корректируемых инерциальных навигацион-

ных систем, решающих задачу топопривязки. М.: Изд-во МГУ, Механико-математический факультет, Препринт 2, 1994.

4. Голован А.А., Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. Изд-во механико-математического факультета МГУ, 2001.

5. А.А. Голован, Н.А. Парусников. Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации.

6. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. М., ИПРРЖР, 1998.

7. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90). Координационный научно-информационный центр. М., 1998 г.

Учебная программа курса
Теория спутниковых навигационных систем
(системы ГЛОНАСС и GPS)

Авторы – д.ф.-м.н. А.А. Голован, к.ф.-м.н. Н.Б. Вавилова.
Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковых навигационных систем (СНС) GPS и ГЛОНАСС. Магистрант должен не только получить представления о функционировании СНС на уровне пользователя, но и освоить методы решения задач обработки первичных спутниковых измерений. Полученные знания позволят магистранту ставить и решать задачи с использованием СНС в различных прикладных областях: построение интегрированных навигационных комплексов, топопривязка, мониторинг железных дорог, геофизические приложения и т.п.

Цель курса – получение и последующее применение студентами представлений о математических моделях и алгоритмах обработки измерений спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

Задачи курса

Дать магистранту подробные сведения о спутниковых навигационных системах GPS и ГЛОНАСС, их структуре, принципе действия, их современном состоянии и перспективах развития. Рассмотреть все типы первичных измерений СНС, их математические модели и задачи обработки первичных измерений (кодовых, доплеровских, фазовых). Изложить алгоритмы решения задач обработки измерений СНС в стандартном и дифференциальном режимах.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс тесно связан с курсами «Теория инерциальных навигационных систем», «Теория оптимального оценивания с приложениями к задачам навигации», «Корреляционная теория

стационарных случайных процессов и методы определения их характеристик». Он является составной частью теории навигационных систем.

1. Введение – 2 часа

История создания и развития спутниковых навигационных систем, основные принципы функционирования.

2. Лекционные занятия

Тема 1. ОПИСАНИЕ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ (СНС) ГЛОНАСС И GPS (1 час)

Раздел 1. Состав спутниковых навигационных систем: наземный, космический сегмент, аппарата пользователя.

Раздел 2. Спутниковые радионавигационные сигналы, основные характеристики. Первичные спутниковые измерения: кодовые (псевдодальность), доплеровские (псевдоскорость), фазовые. Точный и стандартный режимы доступа.

Тема 2. ОРБИТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ (4 часа)

Раздел 3. Траекторная информация системы ГЛОНАСС. Алгоритмы определения координат, скорости, ускорений навигационных спутников.

Раздел 4. Эфемеридная информация системы GPS. Алгоритмы определения координат, скорости, ускорений навигационных спутников.

Раздел 5. Данные международного сервиса IGS и задача уточнения траекторных параметров навигационных спутников систем ГЛОНАСС и GPS.

Тема 3. МОДЕЛИ ПЕРВИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ (2 часа)

Раздел 6. Модели кодовых, фазовых, доплеровских первичных спутниковых измерений. L1 и L2 сигналы. Основные ошибки спутниковых измерений: ошибки эфемеридного обеспечения навигационных спутников, ошибки часов спутников, ионосферные и тропосферные задержки, ошибки многолучевости, селективный доступ.

Тема 4. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРМАТ
СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ RINEX (2 часа)

Раздел 7. Международный формат RINEX. Компактные бинарные форматы, используемые в аппаратуре приемников разных производителей.

Тема 5. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И МОДЕЛИ
ПОЛЯ ТЯГОТЕНИЯ ЗЕМЛИ (2 часа)

Раздел 8. Инерциальная, гринвичская, орбитальная, географическая системы координат. Координатные системы WGS84, параметры Земли 90, система 42г. Алгоритмы пересчета гринвичских и географических координат. Модели поля тяготения Земли.

Тема 6. РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СНС (1 час)

Раздел 9. Стандартный, дифференциальный и относительный режим функционирования спутниковой навигационной системы. Особенности и краткие характеристики.

Тема 7. ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ
ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СНС В СТАНДАРТНОМ
РЕЖИМЕ (4 часа)

Раздел 10. Задача определения местоположения при помощи кодовых измерений СНС. Интегрированный алгоритм определения координат потребителя, координат и скоростей движения навигационных спутников, погрешности часов приемника при помощи кодовых измерений псевдодальностей объект-спутники.

Раздел 11. Использование фазовых измерений для сглаживания кодового позиционного решения.

Раздел 12. Использование двухчастотных измерений СНС для компенсации ионосферной задержки.

Раздел 13. Геометрические факторы.

Раздел 14. Задача определения скорости объекта при помощи доплеровских измерений.

Раздел 15. Определение ускорений объекта при помощи доплеровских и фазовых измерений.

Тема 8. ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СНС В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ И ОТНОСИТЕЛЬНОМ РЕЖИМАХ (4 часа)

Раздел 16. Задача определения местоположения при помощи дифференциальных кодовых измерений СНС дифференциальном и относительном режимах.

Раздел 17. Использование фазовых измерений для сглаживания кодового позиционного решения.

Раздел 18. Использование двухчастотных измерений СНС для компенсации ионосферной задержки.

Раздел 19. Задача определения скорости объекта при помощи дифференциальных доплеровских измерений дифференциальном и относительном режимах.

Раздел 20. Определение ускорений объекта при помощи дифференциальных доплеровских и фазовых измерений.

Тема 9. Определение местоположения при помощи дифференциальных фазовых измерений (2 часа)

Раздел 21. Постановка задачи определения местоположения при помощи фазовых измерений. Плавающее и целочисленное решения для фазовых неоднозначностей. Обзор методов разрешения целочисленных неопределенностей фазовых измерений.

4. Контрольные задания – экзамен.

5. Литература

1. Голован А.А., Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. Изд-во механико-математического факультета МГУ, 2001.

2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. М., ИПРРЖР, 1998.

3. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90). Координационный научно-информационный центр. М., 1998 г.

4. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной спутниковой системы и глобальной системы пози-

ционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. Госстандарт России, Москва.

5. Global Positioning System. Standard Positioning Service. Signal Specification. 2nd Edition. June 2, 1995.

6. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. GPS: Theory and Practice, 4th edn. SpringerWienNewYork.

7. A. Leick. GPS satellite surveying, 2nd edn. Wiley, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore, 1995.

Учебная программа курса
Навигационные приложения

Автор – профессор Н.А. Парусников, д.ф.-м.н. А.А. Голован.
Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Знание современных задач приложения теории инерциальных навигационных систем, методов их решения. Способность самостоятельного изучения задач такого класса, умение выполнить постановку задачи, предлагать методы ее решения.

Цель курса – глубокое освоение современной теории навигационных систем.

1. Введение – 2 часа

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Задачи калибровки чувствительных элементов навигационных систем. Математические модели инерциальных датчиков. Задача калибровки блока ньютометров и требования к стендовому оборудованию. Задача калибровки гироскопов и датчиков моментов платформенных инерциальных навигационных систем и требования к стендовому оборудованию. Задача калибровки датчиков угловой скорости безкарданных инерциальных навигационных систем и требования к стендовому оборудованию. Взаимная калибровка геометрических ошибок блоков ньютометров и гироскопов. **6 часов.**

Раздел 2. Задача выставки платформенных инерциальных навигационных систем на неподвижном основании. Грубая и точная выставка. Двойное гирокомпасирование. Выставка по заданному курсу. **4 часа.**

Раздел 3. Задача выставки безкарданных инерциальных навигационных систем на неподвижном основании. Грубая и точная выставка. Выставка по заданному курсу. Различные функциональные схемы решения задачи. **2 часа.**

Раздел 4. Задача коррекции в инерциальной навигации. Вариант оценивания и вариант введения обратных связей. Информационная эквивалентность этих вариантов. **2 часа.**

- Раздел 5. Задача коррекции инерциальной навигационной системы при помощи вторичной информации спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS – слабосвязанное комплексирование. Позиционная и скоростная спутниковая информация. Учет смещения спутниковой антенны относительно приведенного центра инерциальной системы. **2 часа.**
- Раздел 6. Задача коррекции инерциальной навигационной системы при помощи первичных измерений спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS: кодовые (псевдодальности), доплеровские (псевдоскорости), фазовые измерения. Тесно и сильно связанное комплексирование. **4 часа.**
- Раздел 7. Алгоритмы решения задачи топопривязки при помощи инерциальной навигационной системы, спутниковой навигационной системы, одометра и режима движения объекта с остановками (Zupt – Zero Velocity Update Technology). **2 часа.**
- Раздел 8. Задача астрокоррекции инерциальной навигационной системы. **2 часа.**
- Раздел 9. Задача довыставки инерциальной навигационной системы как частный случай задачи коррекции. **4 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Литература

Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 1982.

Голован А.А., Горицкий А.Ю., Парусников Н.А., Тихомиров В.В. Алгоритмы корректируемых инерциальных навигационных систем, решающих задачу топопривязки. М.: Изд-во МГУ, Механико-математический факультет, Препринт 2, 1994.

Голован А.А., Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. Изд-во механико-математического факультета МГУ, 2001.

Деревянкин А.В., Матасов А.И. Методика калибровки блока акселерометров при грубой информации о его угловом положении. М.: Изд-во центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2006.

Учебная программа курса
Математические методы задачи аэрогравиметрии

Автор – профессор Ю.В. Болотин.

Количество кредитов – 7.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать основные понятия и методы авиационной гравиметрии. Он должен владеть теорией гравитационного поля Земли, включая теорию внешних и внутренних краевых задач для уравнений Лапласа и Пуассона, функции Грина и Стокса, разложение гравитационного поля по сферическим функциям, понятия аномального и нормального гравитационного поля Земли, понятиями референт – эллипсоида, геоида, аномалии высоты. Магистрант должен быть знаком с основными принципами конструирования авиационных гравиметрических систем, их составными частями – ИНС, СНС, акселерометрами. Он должен уметь выводить уравнения идеальной работы и уравнения ошибок таких систем, анализировать вклад различных составляющих ошибок определения гравитационной аномалии. Магистрант должен освоить основные принципы обработки данных аэрогравиметрии, получить практические навыки работы с реальными данными съемки.

Магистрант должен владеть основными приемами трансформации аэрогравиметрических данных – построение карт, редукция на поверхность референц-эллипсоида, вычисление уклонений отвесных линий. Он должен быть знаком с основными применениями аэрогравиметрии в геофизике, геологии и разведке полезных ископаемых.

Цель курса – получение и последующее применение студентами ключевых представлений и методологических подходов авиационной гравиметрии.

Задачи курса

Дать магистранту представления об основных принципах гравиметрии и, в частности, наземной, авиационной и морской гравиметрии. Изложить теорию гравитационного поля Земли,

включая экскурс в теорию краевых задач для уравнения Лапласа, теорию функций Грина и Стокса. Ввести понятия геоида, референц-эллипсоида, сфероида, нормального и аномального гравитационных полей Земли. Ввести разложение поля по сферическим функциям, описать модели EGM-96, ПЗ-90.

Изложить принципы построения аэрогравиметрических систем, описать их основные элементы – гиро-стабилизированную платформу, приемник СНС, работающий в фазо – дифференциальном режиме, гравиметрический чувствительный элемент. Дать примеры конкретных систем. Научить магистранта выводить уравнения идеальной работы и уравнения ошибок таких систем. Сформулировать и решить задачу обработки данных аэрогравиметрии как задачу оптимальной фильтрации сигнала на фоне шума.

Изложить основы построения и трансформаций карт аномального гравитационного поля, по данным аэрогравиметрии. Ввести понятия редукации поля на высоту референц-эллипсоида, вычисления уклонов отвесных линий. Описать основные алгоритмы трансформаций – метод Вениг-Мейнеса, метод коллокаций, метод Фурье.

Дать магистранту навыки, необходимые для обработки данных реальных авиационных гравиметрических систем, включая практические занятия.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс относится к специальным курсам навигационного направления магистерской программы. Для его освоения надо прослушать курсы «Прикладная теория управления», «Спектральная теория случайных процессов», «Основы инерциальной навигации», «Спутниковая навигация». Изучение этого курса, наряду с двумя последними указанными, служит основой для фундаментальной подготовке магистранта в области навигации и ее приложений.

1. Введение – 2 часа

Предмет и задачи дисциплины. Роль дисциплины в навигации, изучении строения Земли, разведке полезных ископаемых.

Связь со смежными дисциплинами: инерциальной навигацией, наземной и морской гравиметрией.

2. Лекционные занятия

Тема 1. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Раздел 1. Геоид, нормальное поле, гравитационная аномалия. **2 часа.**

Раздел 2. Аномалия в свободном воздухе, аномалия Буге, топографическая коррекция **2 часа.**

Раздел 3. Математические основы трансформаций – задачи Дирихле и Неймана, функции Грина, интегралы Стокса и Пуассона. **2 часа.**

Раздел 4. Разложение поля по сферическим гармоникам. Модель EGM96. **2 часа.**

Раздел 5. Стохастические модели аномалии гравитационного поля. **2 часа.**

Тема 2. ГРАВИМЕТРЫ

Раздел 6. Типы гравиметров, принципы работы. Векторная и скалярная гравиметрия. **2 часа.**

Раздел 7. Принцип работы и составные части авиационного гравиметра **2 часа.**

Раздел 8. Гравиметрический чувствительный элемент – типы, модели погрешностей. **2 часа.**

Раздел 9. Горизонтируемая платформа, спутниковая навигационная система. Модели погрешностей. **2 часа.**

Раздел 10. Суммарный спектральный состав погрешностей гравиметра. **2 часа.**

Раздел 11. Устройство и особенности работы гравиметра GT1A. **2 часа.**

Тема 3. ОСНОВНОЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ

Раздел 12. Вывод основного гравиметрического уравнения. Поправка Этвеша. Уравнения измерений. **2 часа.**

Раздел 13. Сведение задачи определения аномального поля в полете к смешанной задаче ММП. **2 часа.**

Раздел 14. Численные методы решения задачи – КИХ-фильтры, фильтр Калмана. Разрешающая способность фильтра. **2 часа.**

Раздел 15. Калибровка гравиметра на стенде. **2 часа.**

Раздел 16. Калибровка гравиметра в полете и контроль качества данных. **2 часа.**

Тема 4. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ АНОМАЛИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Раздел 17. Понятие карты поля. Точность и разрешающая способность. Планирование авиационной съемки. **2 часа.**

Раздел 18. Построение карты по данным авиационной съемки. Детерминированный и стохастический подходы. **2 часа.**

Раздел 19. Уравнивание карты, поперечное сглаживание. **2 часа.**

Тема 5. ТРАНСФОРМАЦИИ КАРТ

Раздел 20. Трансформации методом Фурье. Разделение поля на две частотные составляющие с использованием EGM-96. **2 часа.**

Раздел 21. Трансформации методом коллокации с использованием стохастической модели аномалии. **2 часа.**

Раздел 22. Определение уклонений отвеса и высоты геоида, поднятие и опускание поля. **2 часа.**

Тема 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

1. Спектральный анализ погрешностей авиационного гравиметра. **6 часов.**
2. Проектирование гравиметрических фильтров. **4 часа.**
3. Построение карты поля в пакете МАТЛАБ. **6 часов.**
4. Выездная практика в ЗАО «Гравиметрические технологии». **8 часов.**

3. Методические рекомендации и пособия по изучению курса или дисциплины

1. Болотин Ю. В., Голован А. А., Парусников Н. А. Уравнения аэрогравиметрии. Алгоритмы и результаты испытаний. Москва: Издательство Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2002. 120 с.

2. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А., Трубников С.А. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный

режим. Москва: Издательство Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2001. 100 с.

3. В.Н. Бержицкий, Ю.В. Болотин, А.А. Голован, В.Н. Ильин, Н.А. Парусников, Ю.Л. Смоллер, С.Ш. Юрист. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1. Результаты летных испытаний. Москва, МГУ, Механико-математический факультет, 2002.

4. Контрольные задания – экзамен, зачеты по задачам практикума.

5. Литература

1. Торге В. Гравиметрия. Пер. с англ. Москва: Изд-во «Мир», 1999. 429 с.

2. Stepanov O.A., Blazhnov B.A., Koshaev D.A. The Efficiency of Using Velocity and Coordinate Satellite Measurements in Determining Gravity Aboard an Aircraft. Proceeding of the 9th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Russia, St.Petersburg, May 27–29, 2002.

3. Wei M., Schwarz K.P. Analysis of GPS-derived Acceleration from Airborne Tests. Proceeding of the IAG Symposium on Airborne Gravity Field Determination, IUGG XXI General Assembly. Calgary, August 1995.

4. Болотин Ю. В., Голован А. А., Кручинин П. А., Парусников Н. А., Тихомиров В. В., Трубников С. А. Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний. Вестник МГУ. Серия матем., мех. 1999. Выпуск 2 – сс. 36–41.

5. Гравиразведка: справочник геофизика. Под ред. Мудрецовоу Е. А., Веселова К. Е. Второе издание. Москва: Изд-во «Недра», 1990. 607 с.

6. Болотин Ю.В., Попеленский М.Ю. Анализ точности решения задачи авиагравиметрии на основе стохастических моделей «Авиакосмическое приборостроение», Вып. 4, 2003 – сс. 42–48.

Учебная программа курса
Гарантирующее оценивание в задачах навигации

Автор – д.ф.-м.н. А.И. Матасов.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант получает представление о многообразии подходов к оцениванию при решении прикладных задач, в частности, возникающих в навигации. Он владеет общими концепциями описания неопределенности. Магистрант умеет строить вариационные проблемы, соответствующие разным постановкам задач оценивания, и сводить их к типичным задачам математического программирования. Обучаемый знакомится с базовыми понятиями гарантирующего подхода к оцениванию, теории выпуклых вариационных задач, теории двойственности, теории равномерного приближения. Он умеет анализировать соответствующие математические проблемы и применять численные методы для расчета оптимальных решений. Магистрант владеет методами построения уровней неоптимальности алгоритмов решения задач оценивания. Таким образом, магистрант обладает широким взглядом на решение прикладных задач оценивания в условиях неопределенности.

Цель курса – получение широких базовых представлений о задачах оценивания и о методах решения прикладных задач оценивания с помощью гарантирующего подхода.

Задачи курса

Дать магистранту представление об основных подходах к описанию неопределенности. Подробно исследовать одну из основных задач гарантирующего оценивания – «схему бортиков» и ее обобщения. Свести эту задачу к соответствующим вариационным проблемам. Вывести и проанализировать необходимые и достаточные условия оптимальности решения этих вариационных проблем. Изучить связь этих вариационных проблем с задачей линейного программирования. Познакомиться с теорией двойственности и теорией равномерного приближения функций для использования этих теорий в решении задач гарантирующего

оценивания. Показать как фундаментальные понятия теории экстремальных задач (например, функция Лагранжа, теорема Куна-Таккера и т. д.) применяются к решению прикладных задач оценивания. Познакомить магистранта с новой теорией построения уровней неоптимальности приближенных алгоритмов решения задач оценивания. Дать магистранту необходимые знания и навыки для самостоятельной постановки, анализа и решения различных прикладных задач гарантирующего оценивания, в частности, возникающих в навигации.

Место курса в процессе подготовки магистра

Курс относится к фундаментальной подготовке магистранта и обучает его применению глубоких математических результатов к решению прикладных задач оценивания, в частности, задач оценивания, возникающих в навигации. Для его освоения необходимы знания основ функционального анализа, теории вероятности, теории экстремальных задач. Понятия и результаты данного курса могут быть использованы в курсах «Инерциальная навигация», «Прикладная теория оценивания», в практикуме «Спутниковая навигация».

1. Введение

Предмет и задачи дисциплины. Роль дисциплины в навигации и управлении аэрокосмическими объектами.

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Задачи спутниковой навигации. Неопределенность статистических характеристик шумов. Задачи оценивания в инерциальных навигационных системах.

Раздел 2. Гарантирующее оценивание параметров. «Схема бортиков» М.Л. Лидова. Сведение задачи оценивания к экстремальной проблеме. Описание помех многогранниками.

Раздел 3. Случай непрерывных измерений. Допустимые оценщики. Проблема моментов. Существование решения проблемы моментов.

Раздел 4. Линейное программирование. Существование решения. Сведение задачи оптимального гарантирующего оценивания к линейному программированию.

- Раздел 5. Необходимые и достаточные условия оптимальности оценителя. Примеры решения простейших задач.
- Раздел 6. Элементы теории двойственности. Чебышевское приближение обобщенными полиномами. Оптимальные моменты измерений.
- Раздел 7. Метод наименьших квадратов. Уровень неоптимальности метода наименьших квадратов в задачах гарантирующего оценивания. Уровень неоптимальности приближенного решения проблемы моментов. Формула М.Л. Лидова.
- Раздел 8. Принцип Лагранжа и двойственность. Выпуклые экстремальные задачи Теорема Куна-Таккера и ее обобщения. Седловые точки. Прямая и двойственная задачи. Вывод уровней неоптимальности.
- Раздел 9. Неопределенные детерминированные возмущения в динамических системах. Формула для гарантированной ошибки оценки.
- Раздел 10. Условия оптимальности оценителя и их вывод на основе теоремы Лагранжа. Вычисление оценителей для динамических систем.
- Раздел 11. Нелинейные оценители в абстрактной линейной задаче гарантирующего оценивания. Оптимальность линейных оценителей. Теорема С.А. Смоляка.
- Раздел 12. Уровень неоптимальности фильтра Калмана в задаче гарантирующего оценивания. Случай комбинированных помех.
- Раздел 13. Примеры вычисления границ уровней неоптимальности для задач навигации.

3. Контрольные задания – экзамен.

Литература

1. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. М.: Наука, 1974.
2. Экланд И., Темам Р. Выпуклый анализ и вариационные проблемы. М.: Мир, 1979.
3. Матасов А.И. Введение в теорию гарантирующего оценивания. М.: Изд-во МАИ, 1999.
4. Matasov A.I. Estimators for Uncertain Dynamic Systems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 1998.

Учебная программа курса
Функциональный анализ и оптимальное управление
движением

Автор – профессор В.В. Александров.
Количество кредитов – 4.

Обеспечиваемые компетенции

Специалист в области Навигации и Управления должен уметь создавать новые алгоритмы, позволяющие в сложных ситуациях, возникающих на Земле и в Космосе, осуществлять управляемые движения различных мобильных систем с наилучшим качеством. Это возможно лишь при оптимизации создаваемых алгоритмов. Для изучения современных методов оптимизации необходимо знание основных элементов функционального анализа. Прослушавший этот курс будет в состоянии не только модернизировать существующие алгоритмы навигации и управления, но создавать новые алгоритмы на фундаментальной базе функционального анализа.

Цель курса – показать, как основные понятия, теоремы и методы функционального анализа помогают освоить теорию оптимального управления. При этом предполагается, что конструктивные доказательства теорем предоставляют слушателям возможность на их основе создавать новые алгоритмы оптимизации решения задач навигации и управления.

Задача курса.

Обучить слушателей умению применять на практике известные оптимальные алгоритмы управления и создавать новые подходы и приемы для решения конкретных задач управления.

Связи с другими курсами магистерской программы.

Данный курс связан с курсами по численным методам решения задач навигации и управления.

1. Введение – 2 часа

2. Лекционные занятия

Тема 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Раздел 1. Кусочно программное управление. Задача Коши, оператор сжатия, существование и единственность управляемого движения. **1 час.**

Раздел 2. Дифференциальный оператор в окрестности управляемого движения, Производная Фреше. Синтез стабилизирующих управлений. **1 час.**

Раздел 3. Функциональное ограничение на управление, фазовые ограничения и смешанные ограничения. Теорема существования оптимального управления. **1 час.**

Тема 2. ПРИНЦИП ЛАГРАНЖА В ГАМИЛЬТОНОВОЙ ФОРМЕ И НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Раздел 4. Линейные и сопряженные операторы в банаховых пространствах. Формулировка принципа Лагранжа. **1 час.**

Раздел 5. Необходимые условия слабого локального минимума при отсутствии ограничений. Уравнение Эйлера в гамильтоновой форме. **1 час.**

Раздел 6. Принцип максимума Понтрягина – необходимые условия сильного локального минимума при наличии ограничений. **2 часа.**

Тема 3. ТЕОРЕМЫ ОТДЕЛИМОСТИ И АЛГОРИТМ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Раздел 7. Теорема Хана – Банаха в геометрической формулировке. **1 час.**

Раздел 8. Редукция задач оптимального управления к геометрическим задачам в Евклидовом конечномерном пространстве. **1 час.**

Раздел 9. Аппроксимация множества выпуклым конусом и построение почти тождественного оператора. **1 час.**

Раздел 10. Сопряжённые конусы и теорема делимости системы конусов. Формулировка алгоритма доказательства необходимых условий. **1 час.**

Раздел 11. Доказательство необходимых условий оптимальности для минимаксной задачи. **2 часа.**

Раздел 12. Доказательство принципа максимума Понтрягина. **2 часа.**

Тема 4. АНОРМАЛЬНЫЕ СИТУАЦИИ В ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ

Раздел 13. Анормальная точка локального минимума в задаче Лагранжа об условном экстремуме и необходимое условие второго порядка. **2 часа.**

Раздел 14. Особое оптимальное управление и необходимые условия Кэлли k -го порядка ($k > 1$). **1 час.**

Раздел 15. Существование chattering стратегии оптимального управления при соединении особого участка порядка $k=2q$ ($q>1$) с регулярным участком оптимальной траектории. **2 часа.**

Тема 5. ПРИМЕРЫ

Раздел 16. Максиминное тестирование качества робастного управления. **2 часа.**

Раздел 17. Субоптимальное управление сингулярно возмущенной системой. **2 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Литература

А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин «Элементы теории функций и функционального анализа». Наука.1972.

В.А. Садовничий «Теория операторов». Физматлит. 2000.

А.А. Милютин, А.В. Дмитрук, В.В.Осмоловский «Принцип максимума в оптимальном управлении». Издательство МГУ. 2004.

В.В.Александров, В.Г. Болтянский, С.С. Лемак, Н.А. Парусников, В.М. Тихомиров «Оптимальное управление движением». Физматлит. 2005.

Л.А. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.А. Сёмина «Теория игр».1998.

Учебная программа курса
**Алгоритмы численного решения задач
оптимального управления и оценивания**

Автор – д.ф.-м.н. С.С. Лемак.
Количество кредитов – 3.

Разработка современных систем управления невозможна без применения вычислительных машин и использования численных методов в реализации оптимальных законов управления. В курсе «Алгоритмы численного решения задач оптимального управления и оценивания» рассмотрены основные численные методы решения задач оптимального управления, применяемые на практике. Одну группу методов составляют методы решения двухточечной краевой задачи. К другой группе относятся методы, использующие схемы динамического программирования. Третью группу составляют алгоритмы, использующие редукцию к линейным задачам – квазилинеаризация по Р. Беллману, метод последовательной линеаризации Р.Федоренко.

1. Лекционные занятия

Тема 1. ОПТИМИЗАЦИЯ В КОНЕЧНОМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

- Раздел 1. Алгоритмы безусловной оптимизации функции одного переменного. **1 час.**
- Раздел 2. Минимизация гладких функций. Градиентные методы. Метод Ньютона. **1 час.**
- Раздел 3. Алгоритм оптимизации метода сопряженных градиентов. **1 час.**
- Раздел 4. Поиска минимума нелинейной функции при линейных ограничениях. **1 час.**
- Раздел 5. Поиск минимума при нелинейных ограничениях. Штрафные и барьерные функции. Метод модифицированных функций Лагранжа. **3 часа.**
- Раздел 6. Методы приведенных градиентов и проекций градиентов. **1 час.**
- Раздел 7. Алгоритмы решения многоэкстремальных задач. **2 часа.**

Тема 2. ОПТИМИЗАЦИЯ В БЕСКОНЕЧНОМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Раздел 8. Необходимые условия оптимальности для задач управления. Принцип максимума Понтрягина. **2 часа.**

Раздел 9. Численные методы расчета оптимальных управлений, использующие необходимые условия экстремума. Простейшие способы решения краевых задач. **1 час.**

Раздел 10. Методы решения двухточечной краевой задачи. **1 час.**

Раздел 11. Краевые задачи для линейных дифференциальных уравнений. Метод прогонки. **2 часа.**

Раздел 12. Методы решения задач со свободным концом траектории. Метод Крылова-Черноуьско и его модификации. **1 час.**

Раздел 13. Алгоритмы, использующие редукцию к линейным задачам. Квазилинеаризация по Р.Беллману. **1 час.**

Раздел 14. Учет фазовых ограничений. Метод последовательной линеаризации Р.Федоренко. **2 часа.**

Раздел 15. Алгоритмы решения задач линейного программирования. **2 часа.**

Раздел 16. Методы, использующие схемы динамического программирования. Метод локальных вариаций. **2 часа.**

2. Практические занятия

1. Задача минимизации функции Розенброка градиентными методами. **2 часа.**

2. Решение краевой задачи для линейной системы 2-го порядка методом прогонки. **2 часа.**

3. Задача быстрогодействия для системы 3-го порядка. Численное решение двухточечной краевой задачи принципа максимума. **2 часа.**

4. Задача о плоте. Численно решение краевой задачи. **2 часа.**

5. Задача о максимальном подъеме ракеты с минимальным расходом топлива. Численное решение краевой задачи.

6. Задача о параметрическом возмущении колебаний маятника. Численное решение краевой задачи. **2 часа.**

3. Контрольные задания – зачет по задачам практикума и экзамен по теории.

4. Литература

1. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б, Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Ж Высшая шк., 2003.
2. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980.
3. Беллман Р., Калаба Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи. М: Мир, 1968.
4. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
5. Гилл Ф., Мюрей У., Райт М. Практическая оптимизация. М: Мир, 1985.
6. Григорьев И.С. Методическое пособие по численным методам решения краевых задач принципа максимума в задачах оптимального управления. М.: МГУ, 2005.
7. Любушин А.А. О применении модификаций метода последовательных приближений для решения задач оптимального управления// Ж. вычислит. мат. и мат. физ., 1982, Т. 22, № 1.
8. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М: Наука, 1971
9. Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах. М.: Наука, 1978.
10. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.
11. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980.

Учебная программа курса
**Максиминное тестирование качества стабилизации
управляемых движений**

Автор – профессор В.В. Александров.

Количество кредитов – 3.

Курс «Максиминное тестирование качества стабилизации управляемых движений» посвящен изложению оригинальной методики тестирования, которая позволяет получить объективные показатели точности выполнения оператором поставленной задачи при экстремальных условиях ее выполнения. Выбор тестирующих возмущений и оценка предельных возможностей по точности стабилизации управляемых движений основаны на решении некоторой дифференциальной игры. В курсе рассматриваются методы решения такого класса игровых задач. Большое значение тестирование качества управления приобретает в ситуациях, когда непомерно велика цена ошибки при управлении динамическим объектом, например в случае полуавтоматической стабилизации аэрокосмического полета.

1. Введение – 2 часа

Задача тестирования качества управления. Функциональная схема максиминного тестирования. Задача первого этапа тестирования.

2. Лекционные занятия

Тема 1. МАТРИЧНЫЕ ИГРЫ

Раздел 1. Антагонистические игры в нормальной форме. **1 час.**

Раздел 2. Максиминные и минимаксные стратегии. Седловая точка игры. **1 час.**

Раздел 3. Смешанное расширение игры. Существование оптимальных стратегий. **2 часа.**

Раздел 4. Итеративные методы решения матричных игр. **2 часа.**

Тема 2. БЕСКОНЕЧНЫЕ АНТАГОНИСТИЧЕСКИЕ ИГРЫ

Раздел 5. ε -седловые точки и ε -оптимальные стратегии. **1 час.**

Раздел 6. Игры с непрерывной функцией выигрыша. Игры с выпуклой функцией выигрыша. **1 час.**

Раздел 7. Игры преследования. **1 час.**

Тема 3. ПОЗИЦИОННЫЕ ИГРЫ

Раздел 8. Многошаговые игры с полной информацией. **2 часа.**

Тема 4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИГРЫ

Раздел 9. Антагонистические дифференциальные игры. Кусочно-программные стратегии. **1 час.**

Раздел 10. Существование ε -седловой точки в игре с фиксированным временем. **2 часа.**

Раздел 11. Игры сближения-уклонения. Стабильный мост. Маленькая игра. Экстремальная стратегия. **2 часа.**

Раздел 12. Регулярная игра сближения. Экстремальное прицеливание. **1 час.**

Раздел 13. Экстремальное прицеливание в линейной системе. **1 час.**

Раздел 14. Редукция дифференциальной игры к геометрической. Алгоритм поиска седловой точки. **2 часа.**

Раздел 15. Реализация второго и третьего этапов максиминного тестирования. **1 час.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Литература

1. Александров В.В, Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимальное управление движением. М.: Физматлит, 2005.

2. Оуэн Г. Теория игр. М.: Едиториал УРСС, 2004.

3. Петросян Л. А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр М.: Высшая школа, 1998.

4. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. М: Наука, 1974

5. Красовский Н.Н. Управление динамической системой. М.: Наука, 1985.

6. Петросян Л.А. Дифференциальные игры преследования, Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.

Учебная программа курса
Компьютерный анализ управляемых механических систем

Автор – доцент П.А. Кручинин.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать основы пользования современными вычислительными научными пакетами и уметь решать практические вычислительные задачи в области механики управляемых систем. Магистрант должен получить ключевые представления и освоить методологические подходы, направленные на решение задач компьютерного моделирования и построения управления с использованием современных вычислительных пакетов. Магистрант должен освоить круг задач, на решение которых ориентированы соответствующие программные средства, и научиться выбирать программное обеспечение, соответствующее решаемой задаче. Студент должен освоить основные ограничения при применении тех или иных программ пакета и освоить методы их преодоления. Магистрант должен получить навык практического использования пакетов MATLAB и MAPLE, научиться решать в них практические задачи.

Цель курса – получение и последующее применение студентами ключевых знаний для решения задач механики с использованием современных научных пакетов.

Задачи курса

Дать магистранту представления о возможностях современных вычислительных научных пакетов, используемых при решении задач математического моделирования и анализа механических систем и при разработке алгоритмов управления.

Рассмотреть основные принципы работы пакетов этого типа. Обсудить используемые в них алгоритмы.

Дать магистранту практические навыки работы с вычислительными пакетами MATLAB и MAPLE.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс тесно связан с курсами «Устойчивость и стабилизация движения аэрокосмических систем», «Прикладная теория управления». Знания и навыки, полученные в рамках курса используются в ряде спецкурсов и практикумов.

1. Введение

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Пакет MATLAB. Интегрированная среда. Язык программирования. Синтаксис. Стандартные функции языка. Ввод-вывод. Сохранение информации. **4 часа.**

Раздел 2. Матричная алгебра языка MATLAB. Задание матриц и векторов. Операции над матрицами и функции от матриц. **2 часа.**

Раздел 3. Графические функции пакета. Двумерные графики и трехмерные кривые и поверхности. **4 часа.**

Раздел 4. Условный оператор и циклы. Переключатели. Программирование в пакете MATLAB. **2 часа.**

Раздел 5. Мультипликация с использованием movie. **1 час.**

Раздел 6. Графический интерфейс пользователя. Введение в GUI. Простейшая реализация мультипликации, как последовательности графиков при невидимых координатных осях. **2 часа.**

Раздел 7. Решение нелинейных алгебраических систем уравнений. **2 часа.**

Раздел 8. Решение задачи минимизации. **1 час.**

Раздел 9. Численное решение задачи Коши. ODE функции. Опции решателя. Особенности моделирования систем с разрывными характеристиками в правых частях. **4 часа.**

Раздел 10. Численное решение краевых задач. **2 часа.**

Раздел 11. Способы описания управляемой системы в пакете MATLAB. Блочная модель системы. Составление модели системы по моделям отдельных блоков. **4 часа.**

Раздел 12. Моделирование в среде SIMULINK. Моделирование последовательности событий. Логические цепи. **2 часа.**

Раздел 13. Использование SIMULINK для численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Моделирование динамических процессов. **5 часов.**

- Раздел 14. Функции SIMULINK. Преобразование схемы SIMULINK в выполняемый exe-файл. **1 час.**
- Раздел 15. Исследование амплитудно-частотных характеристик. Исследование переходных функций и решение задачи Коши для линейной системы. **2 часа.**
- Раздел 16. Проверка наблюдаемости и управляемости системы. Декомпозиция по наблюдаемым и управляемым подпространствам. **2 часа.**
- Раздел 17. Простейшее замыкание системы управления – ПИД-регулятор. Выбор параметров ПИД-регулятора по критерию устойчивости. **2 часа.**
- Раздел 18. Проектирование линейных регуляторов в пространстве L2. Четырехполосник. Описание входов – возмущений и контролируемых – выходов. **4 часа.**
- Раздел 19. Задача робастного управления. Hinf-регулятор. **2 часа.**
- Раздел 20. Дискретные системы – модель мехатронных систем. Дискретная модель непрерывной системы. Дискретные линейные системы и их моделирование в системе MATLAB. Z-преобразование. Устойчивость дискретных систем. Выбор управления. **2 часа.**
- Раздел 21. Фильтрация данных. Непараметрическое оценивание. **4 часа.**
- Раздел 22. Фурье анализ. **2 часа.**
- Раздел 23. Символьные вычисления пакета MAPLE. Команды и операторы. **1 час.**
- Раздел 24. Матричные и векторные преобразования. **1 час.**
- Раздел 25. Функции пакета. Дифференцирование, интегрирование, вычисление рядов. Упрощение записи результатов вычислений. **2 часа.**
- Раздел 26. Численные вычисления в пакете MAPLE. **2 часа.**
- Раздел 27. Графика в пакете MAPLE. **2 часа.**
- Раздел 28. Решение алгебраических уравнений. **2 часа.**
- Раздел 29. Решение дифференциальных уравнений. Составление и решение уравнений Лагранжа. **4 часа.**
- Раздел 30. Сопряжение пакетов MAPLE и MATLAB. **2 часа.**

3. Практические занятия

1. Решение нелинейных уравнений. Функции `fzero` и `fsolve`.
2. Плоская задача определения координат приемника по псевдодалностям до трех спутников.
3. Модели аттракторов. Тяжелый шарик на поверхности второго порядка.
4. Область достижимости двузвенного манипулятора.
5. Отображение движения человека по экспериментальным данным.

4. Контрольные задания – зачет по задачам практикума и экзамен по теории.

Учебная программа курса
Системы стабилизации углового движения
искусственных спутников Земли (ИСЗ)

Автор – к.ф.-м.н. Д.И. Бугров.
Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать основные понятия и соотношения, используемые для описания движения искусственных спутников, и уметь компетентно классифицировать наиболее существенные факторы, воздействующие на это движение, уметь грамотно строить соответствующие математические модели. Магистрант должен получить ключевые представления и освоить методологические подходы, направленные на решение проблем стабилизации углового движения спутников. Магистрант должен получить навык восприятия спутника как сложного объекта, взаимодействующего с окружающей средой, знать и различать способы такого взаимодействия, уметь его моделировать. Он должен иметь компетенции, включающие знания методов активной и пассивной стабилизации, типовые элементы наиболее распространенных систем стабилизации, различные способы построения стабилизирующего управления. Магистрант должен изучить основные типы измерительных устройств, использующихся для решения задач стабилизации углового движения искусственных спутников, уметь строить их математические модели.

Цель курса – получение и последующее применение магистрантами ключевых представлений и методологических подходов, направленных на решение задач стабилизации углового движения искусственных спутников.

Задачи курса

Дать магистранту знания основных понятий, соотношений, и моделей, используемых для описания и анализа движения искусственных спутников.

Рассмотреть различные виды воздействий на спутник, приводящих к изменению его углового положения, и научить магистрантов строить соответствующие математические модели.

На основе указанных видов воздействия дать классификацию и описание основных типов систем угловой стабилизации спутников, методов их построения, алгоритмов, обеспечивающих активную стабилизацию, принципов работы различных измерительных устройств, использующихся такими алгоритмами.

Научить магистрантов грамотно строить математические модели углового движения спутников, проводить качественный и количественный анализ влияния различных элементов системы управления и параметров спутника на результирующие движения.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс является составной частью магистерской программы «Навигация и управление в космосе». На основе базовых знаний курсов «Основы аналитической и небесной механики», «Устойчивость и стабилизация движения аэрокосмических систем», «Основы инерциальной и спутниковой навигации» и «Прикладная теория управления» он формирует представления о методологии решения проблем стабилизации углового движения искусственных спутников, способах построения соответствующих математических моделей и анализа их свойств.

В данном курсе рассмотрены динамические уравнения движения корпуса спутника как абсолютно твердого тела относительно его центра масс и их модификация для случая, когда спутник содержит вращающиеся массы (маховики); возмущающие моменты, действующие на спутник – гравитационный, магнитный, аэродинамический, момент сил светового давления; принципы работы пассивных (гравитационной и магнитной) и активных (реактивной, маховичной, магнитной) систем стабилизации углового движения спутника; математические модели датчиков, используемых для определения углового движения спутника.

1. Введение

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Используемые системы координат – гелиоцентрическая, геоцентрическая, орбитальная. Местная вертикаль – геоцентрическая и гравитационная. Орбита ИСЗ: круговая, эллиптическая. Долгота восходящего узла и наклонение орбиты. Задача ориентации и задача стабилизации. Кинемати-

ческие уравнения. Углы Эйлера. Углы Крылова. Матрица направляющих косинусов. Уравнения Пуассона. Кватернионы. **2 часа.**

Раздел 2. Уравнения Эйлера движения твердого тела вокруг центра масс. Уравнения движения твердого тела, несущего движущиеся тела. Гиросат. Основные возмущающие моменты, действующие на ИСЗ. **2 часа.**

Раздел 3. Гравитационный момент в центральном поле сил тяготения. Положения равновесия на круговой орбите. Используемые модели гравитационного поля Земли. Магнитный момент, действующий на ИСЗ. Модели магнитного поля Земли. Аэродинамический момент и момент сил солнечного давления. Моменты от соударения с метеоритами, движения масс внутри спутника. **2 часа.**

Раздел 4. Пассивные системы стабилизации, их преимущества и недостатки. Гравитационная стабилизация. Гравитационная штанга с демпфером. Тросовая система. **2 часа.**

Раздел 5. Пассивные системы магнитной стабилизации. Гистерезисные стержни. Аэродинамическая стабилизация. Стабилизация силами солнечного давления. Стабилизация ИСЗ вращением вокруг собственной оси. **2 часа.**

Раздел 6. Активные системы стабилизации, их преимущества и недостатки. Стабилизация реактивными двигателями. Учет изменения моментов инерции ИСЗ. **2 часа.**

Раздел 7. Маховичная система. Математические модели электродвигателей. Гироскопические системы стабилизации. **2 часа.**

Раздел 8. Активные системы магнитной стабилизации. Магнитные катушки и магнитные стержни. Комбинированные системы стабилизации. **2 часа.**

Раздел 9. Измерительные устройства – датчики ориентации. Вычисление ориентации ИСЗ по измерениям с Земли. Оптико-электронные приборы. Построители местной вертикали. Солнечные датчики. Датчики звездной ориентации. Магнитометры. **2 часа.**

Раздел 10. Гироскопические датчики. Дифференцирующий гироскоп – датчик угловой скорости. Интегрирующий гироскоп. Гиروهоризонт. Гировертикант. **2 часа.**

Раздел 11. Микроэлектромеханические датчики (МЭМС). Принцип действия одноосных микровиброгироскопов различных конфигураций. **2 часа.**

Раздел 12. Введение в задачу исследования динамики ИСЗ с учетом упругости его элементов. **2 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Литература

Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М., Наука, 1965.

Белецкий В.В., Хентов А.А. Вращательное движение намагниченного спутника. М., Наука, 1985.

Ивандиков Я.М. Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1971.

Каргу Л.И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1980.

Карымов А.А. Определение сил и моментов сил светового давления, действующих на тело при движении в космическом пространстве //ПММ, 1962, т. XXVI, вып. 5, с. 867-876.

Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М., Машиностроение, 1975.

Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. М., Машиностроение, 1977.

Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. М., Машиностроение, 1977.

Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М., Наука, 1974.

Сарычев В.А., Овчинников М.Ю. Динамика спутника с пассивной аэродинамической системой ориентации //Космические исследования, 1994, т. 32, вып. 6, с. 16–33.

Учебная программа курса
Корреляционная теория стационарных случайных процессов и методы определения их характеристик

Автор – профессор Н.А. Парусников.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Освоение указанного курса является обязательным для грамотных специалистов широкого профиля в области управления и оценивания. Помимо того, что он служит базой для понимания опорных курсов, он также излагает методы экспериментального определения стохастических характеристик, необходимые для самостоятельной работы выпускника магистратуры.

Цель курса – заложить основы теории случайных процессов в рамках корреляционных представлений.

Задачи курса: научить магистранта свободному владению соответствующей теорией, позволяющей без труда осваивать опорные курсы и использовать результаты теории в практических разработках.

Место курса в процессе подготовки магистра

Связь указанного курса со всеми остальными курсами очевидна настолько, что не нуждается в комментариях.

1. Введение

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Понятие случайной величины. Основные характеристики: функция распределения и плотность вероятности, математическое ожидание и дисперсия. Основные законы распределения случайной величины: закон равной плотности, нормальный закон, закон Лапласа, законы, связанные с понятием пуассоновского потока событий. **2 часа.**

Раздел 2. Многомерные случайные величины. Момент корреляции, коэффициент корреляции и их вероятностный смысл. Понятие обусловленных распределений, матрица ковариации

и ее свойства. Условное математическое ожидание и условная матрица ковариации для нормально распределенного случайного вектора. **2 часа.**

Раздел 3. Понятие случайных процессов. Стационарные случайные процессы. Три типа сходимости случайных процессов: по вероятности, в среднеквадратичном, почти наверное. Теоремы о дифференцировании и интегрировании случайных процессов. **2 часа.**

Раздел 4. Процессы с ортогональными приращениями. Белый шум: непрерывный и дискретный случай. **2 часа.**

Раздел 5. Линейные стохастические динамические системы. Дискретный и непрерывный случай. Дисперсионные уравнения. **2 часа.**

Раздел 6. Понятие о спектральном разложении стационарных случайных процессов. Основные теоремы. Спектральная плотность и ее свойства, связь с функцией корреляции. **2 часа.**

Раздел 7. Спектральная интерпретация белого шума. Определение стохастических характеристик в линейных стационарных динамических системах спектральными методами. Построение формирующих фильтров. **4 часа.**

Раздел 8. Дискретизация непрерывных случайных процессов. Явление маскировки частот (элайзинга). Интерпретация этого явления методом спектрального разложения. Теорема отсчетов (Котельникова). **2 часа.**

Раздел 9. Оценка среднего значения и корреляционной функции по данным наблюдений. Оценка точности метода. **4 часа.**

Раздел 10. Различные методы оценки спектральных плотностей. Точностные характеристики этих методов. **4 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен.

4. Литература

1. А.М. Яглом. Корреляционная теория стационарных случайных функций. Ленинград, Гидрометеиздат, 1981.

2. Дж. Бендат, АК. Пирсол. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.

Учебная программа курса
Математическое моделирование управляемых систем
(методы малого параметра в задачах навигации
и управления движущимися объектами)

Автор – профессор И.В. Новожилов, к.ф.-м.н. А.В. Влахова.
Количество кредитов – 7.

1. Введение

2. Лекционные занятия

**Тема 1. МЕТОДЫ ПРИБЛИЖЕННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Раздел 1. Информационная избыточность исходных уравнений.

Раздел 2. Способы задания малых параметров. Фракционный анализ. Регулярные и сингулярные возмущения. **1 час.**

Раздел 3. Основные положения теории регулярно и сингулярно возмущенных систем. Приближения по малому параметру. Асимптотические и сходящиеся ряды. Оценка погрешности приближения. **1 час.**

Тема 2. РЕГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Раздел 4. Теорема Пуанкаре. **1 час.**

Раздел 5. Приложения теоремы Пуанкаре. Неизохронность нелинейных колебаний механических систем. Секулярные члены. **1 час.**

**Тема 3. СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫЕ СИСТЕМЫ.
РАЗДЕЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ
С ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ**

Раздел 6. Теоремы Тихонова, Васильевой и Кузьминой. **1 час.**

Раздел 7. Приближенные модели «быстрых» и «медленных» движений сильно демпфированных систем. **1 час.**

**Тема 4. ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ
СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫХ СИСТЕМ.
КОРРЕКТНОСТЬ КЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ.**

Раздел 8. Корректность прецессионной модели гироскопа. **2 часа.**

Раздел 9. Корректность модели абсолютно твердого тела. **2 часа.**

Раздел 10. Корректность модели релаксационных колебаний.
2 часа.

Раздел 11. Корректность модели кинематической связи. **2 часа.**

Тема 5. ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА В СИСТЕМАХ С РАЗРЫВНЫМИ ПРАВЫМИ ЧАСТЯМИ

Раздел 12. Доопределение решения на поверхности разрыва при помощи методов теории сингулярных возмущений. **2 часа.**

Раздел 13. Релейное управление угловым движением космического аппарата. Скользящий режим. **2 часа.**

Тема 6. МЕТОДЫ ОСРЕДНЕНИЯ

Раздел 14. Осреднение в системах с одной быстрой фазой. Оценка погрешности метода осреднения. **2 часа.**

Раздел 15. Осреднение по траекториям порождающей системы. Осреднение в системах с несколькими быстрыми фазами.
0,5 часа.

Раздел 16. Схема осреднения в резонансном случае. **1 час.**

Раздел 17. Осреднение по схеме Волосова. **0,5 часа.**

Тема 7. ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ОСРЕДНЕНИЯ

Раздел 18. Автоколебания в системе с нелинейным трением.
2 часа.

Раздел 19. Вынужденные колебания в системах с «жесткой» и «мягкой» характеристиками восстанавливающей силы.
2 часа.

Раздел 20. Резонансы в системах с квадратичным и кулоновым трением. **2 часа.**

Тема 8. ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Раздел 21. Примеры моделей, приводящих к хаотическим колебаниям. Чувствительность к изменению начальных условий.
2 часа.

Раздел 22. Критерии возникновения хаотических колебаний.
4 часа.

Тема 9. МЕТОДЫ ФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА В КОНКРЕТНОМ ПРИМЕНЕНИИ

Раздел 23. Приближенные математические модели динамики полета.

- Основные понятия и переменные. Аэродинамические силы и моменты. **1 час.**
- Уравнения движения самолета. **2 часа.**
- Нормализация уравнений, введение малых параметров для трех классов – траекторного, баллистического и углового движений. **2 часа.**
- Приближенная математическая модель траекторного движения. Задачи о планировании и горизонтальном установившемся полете. **4 часа.**
- Приближенная математическая модель баллистических движений. Задача о фугоидных колебаниях. **2 часа.**
- Приближенная математическая модель угловых движений относительно центра масс. Задача о стабилизации углового положения при помощи автопилота. **1 час.**

Раздел 24. Приближенные математические модели динамики колесного транспорта.

- «Brush – модель» для контактных сил взаимодействия деформируемого колеса с опорной поверхностью. **2 часа.**
- Приближенные модели колесного экипажа для различных классов его плоского движения. Задача о заносе автомобиля. **4 часа.**
- Задача о «кинематических влияниях» железнодорожного экипажа. **4 часа.**

Раздел 25. Приближенные математические модели робототехнических систем.

- Нормализация уравнений систем с «жестким» управлением. **2 часа.**
- Задача об управлении движением конечности робота. Управление ногой шагающего аппарата. **2 часа.**
- Приближенные математические модели «медленного» и «быстрого» движений шагающего аппарата. Выбор управления. **2 часа.**

Тема 10. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

1. Приложения метода Пуанкаре. **2 часа.**
2. Приложения теории сингулярно возмущенных систем с пограничным слоем. **2 часа.**
3. Скользящие режимы в системах с разрывными правыми частями. **2 часа.**
4. Приложения метода осреднения. **2 часа.**
5. Хаотические колебания механических систем. **2 часа.**

3. Контрольные задания – экзамен по темам 1–7, 9; зачет по теме 10.

4. Литература

1. Новожилов И. В. Фракционный анализ. М.: Изд-во МГУ, 1995.
2. Новожилов И. В. Методы формирования приближенных математических моделей движения.// *Фундаментальная и прикладная математика*. Т. 11, вып. 7, 2005. С. 5–9.
3. Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М.: Высшая школа, 1990.
4. Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений. М.: Наука, 1973.
5. Вазов В. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1968.
6. Кузьмина Р. П. Асимптотические методы для обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: УРСС, 2003.
7. Тихонов А. Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // *Мат. сб.* 1952. Т. 31. № 3. С. 575–586.
8. Ишлинский А. Ю., Борзов В. И., Степаненко Н. П. Лекции по теории гироскопов. М.: Изд-во МГУ, 1983.
9. Новожилов И. В. О переходе к прецессионным уравнениям гироскопии на бесконечном интервале времени.// *Изв. АН СССР. МТТ*. 1971. № 5. С. 10–15.
10. Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. Ч. II. М.: Наука, 1966.
11. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.

12. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.: Физматлит, 1959.

13. Влахова А. В., Новожилов И. В. Разделение движений в системах с разрывными правыми частями.// Сб. науч. трудов «Проблемы механики» к 90-летию академика А. Ю. Ишлинского. М.: Физматлит, 2003. С. 187–195.

14. Моисеев Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1969.

15. Волосов В. М., Моргунов Б. И. Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем. М.: Изд-во МГУ, 1971.

16. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: ГИФМЛ, 1963.

17. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Прикладные методы в теории колебаний. М.: Наука, 1988.

Учебная программа курса
Методы робастного управления

Автор – доцент П.А. Кручинин.

Количество кредитов – 4.

Обеспечиваемые компетенции

В результате освоения курса магистрант должен знать основные методы теории робастного управления и уметь компетентно применять эти методы при исследовании функционирования управляемых систем и разработке алгоритмов управления. Магистрант должен получить освоить частотные методы анализа и синтеза линейных систем управления. Магистрант должен получить ключевые представления и освоить методологические подходы, направленные на решение задач построения управления устойчивого к немоделируемым погрешностям.

Цель курса – получение ключевых представлений и получение навыков применения студентами методов анализа робастности управляемых систем и методов синтеза робастного управления.

Задачи курса

Дать магистранту представления о задачах робастной устойчивости и робастного управления, рассмотреть методы анализа робастной устойчивости, проанализировать различные подходы к построению робастного управления.

Научить магистрантов современным методам анализа и синтеза систем управления. Проиллюстрировать их достоинства и недостатки на практических примерах.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс тесно связан с курсами «Прикладная теория управления». Для решения задач практической части используются знания, полученные студентами в рамках курса «Компьютерный анализ управляемых механических систем». Совместно с курсами «Прикладная теория управления», «Функциональный анализ и оптимальное управление движением», «Алгоритмы численного решения задач оптимального управления и оценивания»

и «Устойчивость и стабилизация движения аэрокосмических систем» позволяет получить достаточно полную картину современных методов разработки управления механическими и аэрокосмическими системами.

1. Введение – 2 часа

Основные понятия современной теории управления.

Линейные управляемые системы. Постановка задачи. Программное управление. Обратная связь. Погрешности модели и реализации. Понятие робастности. Адаптивный и робастный подходы.

2. Лекционные занятия

Тема 1. СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

Раздел 1. Модель управляемой системы в пространстве состояний. Преобразование Лапласа. Передаточные функции и частотная модель передаточной системы. **2 часа.**

Раздел 2. Свойства передаточных функций. Нули и полюса. Блочная модель системы управления. **2 часа.**

Тема 2. УСТОЙЧИВОСТЬ И СТАБИЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

Раздел 3. Устойчивость системы управления. Критерии устойчивости. Запас устойчивости по фазе и амплитуде. Сингулярные числа системы. **4 часа.**

Раздел 4. Стабилизация систем регулятором низкого порядка. П и ПД регуляторы по состоянию. **2 часа.**

Раздел 5. Общий вид стабилизирующих регуляторов. Построение регуляторов с заданным положением полюсов. **2 часа.**

Тема 3. РОБАСТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Раздел 6. Регулирование по выходу. Систематическая погрешность выхода. ПИД-регулятор как простейший способ адаптации. **2 часа.**

Раздел 7. Робастная устойчивость и постановка задачи робастной стабилизации. **2 часа.**

Раздел 8. Критерии робастной устойчивости для характеристических полиномов. Теорема Харитоновна. **2 часа.**

Раздел 9. Робастная устойчивость матриц. Вероятностный подход к проблеме робастной устойчивости. **2 часа.**

Раздел 10. Робастная устойчивость управляемой системы. H_{∞} -норма управляемой системы как мера робастной устойчивости. Теорема о малом коэффициенте усиления. **2 часа.**

Тема 4. РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ

Раздел 11. H_{∞} -подход к построению стабилизирующего регулятора. Параметрический ряд H_{∞} -регуляторов. Робастный H_2 регулятор. 2 Риккати подход. **4 часа.**

Раздел 12. H_{∞} -регулятор и игровая задача управления. **2 часа.**

Раздел 13. Нелинейная задача робастной устойчивости и абсолютная устойчивость. **6 часов.**

3. Практические занятия

АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ И ПОСТРОЕНИЕ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В ПАКЕТЕ MATLAB

1. Математическое моделирование управляемого объекта системы виброзащиты. **2 часа.**
2. Построение амплитудно-частотных характеристик, сингулярных чисел и переходных функций и решение задачи Коши для линейной системы. **2 часа.**
3. Анализ устойчивости управляемых систем. **2 часа.**
4. Построение годографов. **2 часа.**
5. Выбор параметров ПИД-регулятора по критерию устойчивости. **2 часа.**
6. Анализ робастной устойчивости управляемых систем. **2 часа.**
7. Расчет H_2 и H_{∞} норм управляемых систем. **2 часа.**
8. Проектирование линейных регуляторов в пространстве L_2 . Задание четырехполюсника. Описание входов – возмущений и контролируемых – выходов. **2 часа.**
9. Построение H_2 и H_{∞} -регуляторов. **2 часа.**

4. Контрольные задания – экзамен, зачеты по задачам практикума.

5. Литература

1. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление ею – Москва, Наука, 2002.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д.Егупова – М. МГТУ. 2001.
3. Дёч. Г. Руководство по практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования – Москва, Наука, 1971.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов. – М, Диалог-МИФИ, 1999.

Учебная программа курса
Введение в персональную навигацию

Авторы – профессор В.В. Александров, снс Т.Б. Александрова.
Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Слушатели должны знать, как функционирует вестибулярный аппарат, позволяющий (наряду с другими аппаратами-глазным и слуховым) человеку ориентироваться в пространстве. Наличие большого числа аналогий между функционированием различных частей вестибулярного аппарата животного (полукружные каналы, утрикулус, саккулус и лагена) и сенсоров инерциальной навигационной системы позволяет слушателю не только быстрее разобраться в сложном материале, но и понять, как можно осуществлять коррекцию вестибулярного аппарата в экстремальных условиях ориентации человека в окружающем пространстве (падение, ориентация в темноте или незнакомой местности). Под коррекцией подразумевается как использование различных динамических имитаторов для выработки условных рефлексов, так и применение МЭМС технологий для создания прототипов вестибулярных протезов.

Цель курса

Ввести слушателей в новую область научных и прикладных исследований, находящуюся на стыке трех наук: физиологии, механики и математики. Результаты прикладных исследований имеют непосредственное отношение к практической космонавтике, так как базируются на опыте совместной работы с Центром подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина.

Задачи курса

Подготовить слушателей к исследовательской работе на предприятиях космической промышленности в области создания имитационных динамических стендов для коррекции вестибулярных дисфункций и разработки прототипов вестибулярных протезов с возможной коррекцией по сигналам ГЛОНАСС и GPS.

Место курса в процессе подготовки магистра

Данный курс тесно связан с курсами по спутниковой навигации, по инерциальной навигации и курсами физиологической направленности.

1. Введение

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Персональная навигация и ручное управление движущимися объектами.

Раздел 2. Сложное управляемое движение. Необходимость разделения движения и введение двухуровневой системы управления. Автопилот.

Раздел 3. Экстремальные ситуации в персональной навигации. Выработка условного рефлекса по управлению движением в экстремальных ситуациях. Динамические тренажеры.

Раздел 4. Управляемое и неуправляемое падения. Коррекция вестибулярной функции и вестибулярный протез.

Учебная программа курса
***Математические модели
возбудимых клеточных мембран***

Авторы – доцент Н.В. Куликовская.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Применение математических методов к исследованию живых систем, владение пакетами прикладных вычислительных программ и программ для обработки результатов экспериментов.

Цель курса – получение и последующее применение магистрантом ключевых представлений о физиологических процессах, протекающих в живой клетке, ознакомление с методами исследования этих процессов. Ознакомление с функционированием вестибулярной системы животных и с простейшими моделями отдельных звеньев этой системы. Показать возможности применения теории динамических систем, развитой первоначально для описания физических и химических процессов, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений, для понимания самых общих качественных свойств живых систем и исследования относительно простых базовых моделей математической биологии.

Задачи курса

Научить магистрантов получать простые модели физиологических процессов, протекающих в клетке, а также анализировать модели которые предлагаются разными исследователями. Дать магистранту представления о современных методах получения параметров для математических моделей и продемонстрировать возможности использования таких моделей на примерах относящихся к исследованию вестибулярной системы.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс требует знакомства с общими курсами «Теория дифференциальных уравнений», «Теория вероятностей и математическая статистика», «Теория колебаний».

- Раздел 1. Живая клетка, общие характеристики. Плазматическая мембрана клеток, её строение. Разнообразие плазматических мембран. Методы изучения строения и функционирования клеток.
- Раздел 2. Математические модели природных процессов. Модель популяции хищник–жертва. Модель процесса в реакторе дрожжей.
- Раздел 3. Уравнение Больцмана для вероятности переходов системы с одного стационарного энергетического уровня на другой.
- Раздел 4. Ионные каналы плазматических мембран. Перемещение ионов по законам диффузии и по электрическому градиенту. Уравнение Нерста для равновесного потенциала, АКТИВАЦИЯ И ИНАКТИВАЦИЯ ИОННЫХ КАНАЛОВ. Пример: клетка-пейсмекер.
- Раздел 5. Клетки нервной системы животных: нейроны и датчики первичной информации. Паттерны инервации. Афферентные и эфферентные пути.
- Раздел 6. Вестибулярная система животных, её состав и функции. Датчики вестибулярной информации. Волосковые клетки (морфология, состав ионных каналов в мембранах. Паттерны инервации).
- Раздел 7. Методы изучения вестибулярной системы животных (in VIVO: аэро и космические полёты, движения глаз; in VITRO: протоколы volt-clamp и current-clamp в сочетании с электронной и лазерной фотографией).
- Раздел 8. Опыты на вращающихся платформах. (опыты Голдберга-Фернандеса и др). Опыты Раббита с различными инденторами.
- Раздел 9. Характеристики афферентных сигналов от вестибулярных датчиков. Частотная модуляция, регулярный и иррегулярный характер, взаимодействие правосторонних и левосторонних датчиков. Помехозащищённость, чувствительность, быстроедействие, адаптация.

3. Практические занятия

1. Изучение работы ионных каналов с компьютерной программой APSIM.

2. Знакомство с пакетом программ CLAMPFIT.
3. Знакомство с результатами изучения нистагма глаз.

4. Контрольные задания – экзамен, зачеты по задачам практикума.

5. Литература

1. Ходоров Б.И. Общая физиология возбудимых мембран. М. Изд. «Наука» 1975.
2. Орлов И.В. Вестибулярная функция. С-П., «Наука» 1998.
3. Шипов Ф.Ф. и др. Биомеханика вестибулярного аппарата. М. 1997.
4. Рубин А.Б. Биофизика. М. « Книжный дом Университет» 1999.
5. Ризниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. М. Изд. «РХД» 2002.

Инновационная учебная программа курса
Реакции человека на физические факторы
авиационных и космических полетов

Автор – к.ф.-м.н. А.Г. Якушев.

Количество кредитов – 3.

Обеспечиваемые компетенции

Знание основ персональной навигации. Слушатели должны знать, как функционирует вестибулярный аппарат, позволяющий (наряду с другими аппаратами – глазным и слуховым) человеку ориентироваться в пространстве. Понимать механизмы вредного воздействия на вестибулярный аппарат человека физических факторов авиационных и космических полетов.

Цели курса – показать механизмы вредного воздействия на организм человека таких факторов авиа- или космического полета, как перегрузки и невесомость, изменение атмосферного давления и кислородного состава воздуха.

Задачи курса

Изучить особенности работы вестибулярной, зрительной, кровеносной систем в условиях полета. Изучить математические модели вестибулярных рецепторов человека или животного, их взаимодействие, центральная обработка информации, математические модели скелетных мышц и межсистемных взаимодействий. Исследовать современные возможности и перспективы коррекции вестибулярной функции.

Место курса в процессе подготовки магистра

Настоящий курс относится к специальным курсам по основам персональной навигации. Рекомендуется слушать после изучения курсов по навигационным алгоритмам вместе с другими курсами по персональной навигации.

1. Введение

2. Лекционные занятия

Раздел 1. Вестибулярные рецепторы человека. Полукружные каналы. Отолиты. Волосковые клетки. Нервная импульсация.

- Раздел 2. Глаз человека. Вестибуло-окулярные рефлексy. Нистагм. Стабилизация взора. Комфортное расстояние.
- Раздел 3. Авиационные иллюзии. Полет ночью и в облаках при действии вестибулярных нагрузок.
- Раздел 4. Неблагоприятные факторы авиационного полета. Изменение содержания кислорода с высотой. Последствия кислородного голодания. Дыхательные авиационные приборы.
- Раздел 5. Авиационные системы поддержания климата: температура, давление, влажность, газовый состав.
- Раздел 6. Авиационные перегрузки. Реакция системы кровообращения, зрительной системы Противоперегрузочный костюм. Противоперегрузочная тренировка летного состава.
- Раздел 7. Неблагоприятные факторы орбитального космического полета. Невесомость. Реакция кровеносной и вестибулярной систем космонавта на длительное воздействие невесомости. Адаптация к невесомости, реадaptация к земным условиям после возвращения из полета.
- Раздел 8. Имитация авиационных и космических перегрузок. Центрифуга. Параболический полет. Алгоритм имитации орбитальной фазы космического полета. Имитация безопорного движения. Иммерсия. Антиортостатическая проба.
- Раздел 9. Проекты создания искусственной гравитации при межзвездных перелетах. Ускорение Кориолиса. Эксперименты в медленно вращающейся комнате. Переносимость ускорений Кориолиса в земных условиях.
- Раздел 10. Космическое излучение.
- Раздел 11. Скафандр для выходов в открытый космос. Космический мотоцикл. Сейфер.

3. Контрольные задания – экзамен.

ОПИСАНИЕ ПРАКТИКУМОВ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ

Спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС, GPS, Galileo

Концепция практикума

Спутниковые навигационные системы GPS и ГЛОНАСС имеют особую роль в современных системах управления аэрокосмических объектов вблизи Земли, как универсальный поставщик навигационной информации. В перспективе, в результате полного развертывания системы ГЛОНАСС и внедрения третьей частоты системы GPS, эта роль только усилится.

Практикум ставит целью познакомить слушателей с принципами работы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС как в стандартном, так и дифференциальном режиме, основами программирования связи с приемниками, и дает опыт практической навигации на примере геодезической съемки. При выполнении практикума слушатели осваивают технику обработки сигналов, разные подходы к оптимальному оцениванию – метод наименьших квадратов, метод наименьших модулей и др., теорию проверки статистических гипотез. Выполнение практикума включает написание программы в среде MATLAB.

Оборудование

Для выполнения практикума используются приемники GPS и ГЛОНАСС, как бытовые Garmin Etrex, так и высокоточные промышленные Javad, позволяющие вести обработку в фазовом и доплеровском режимах.

Рабочее место для выполнения практикума состоит из:

- ✓ двух приемников СНС
- ✓ переносного персонального компьютера и интерфейсного кабеля
- ✓ программной среды MATLAB и пакета специальных программ связи.

Аннотации задач практикума

Анализ структуры погрешностей спутниковых навигационных систем

Цель задачи – провести анализ и сравнение точности кодовых измерений СНС в стандартном и дифференциальном режимах. При выполнении задачи используются два приемника Garmin Etrex, персональный компьютер. Измерения обоих приемников анализируются на компьютере, строятся корреляционные и спектральные модели погрешностей. Задача включает освоения и программирование современных методов спектральной идентификации систем – периодограммный метод, метод ARMAX, метод идентификации в пространстве состояний.

При выполнении задачи читаются вводные лекции о принципах работы СНС, об источниках погрешностей СНС (ошибка часов, ионосферные и тропосферные задержки, многолучевость) и цифровых способах обработки сигналов.

Основы геодезических съемок

Цель задачи – познакомить слушателей с теоретическими и практическими основами геодезических съемок с использованием СНС. При выполнении задачи используются два приемника Garmin Etrex (подвижный приемник и база), персональный компьютер. Ставится задача провести обмер сквера вблизи Главного здания МГУ. Измерения обоих приемников анализируются на компьютере в системе MATLAB. Задача включает проверку геометрической правильности фигур сквера – окружностей, квадратов, прямоугольников. Проводится сравнение разных методов оценивания – метод наименьших квадратов, метод расширенных наименьших квадратов, метод наименьших модулей. При этом слушатели осваивают теорию и практику проверки статистических гипотез.

При выполнении задачи читается вводная лекция о принципах работы СНС, современных методах оценивания и проверки гипотез.

Программирование обмена данными с приемниками СНС

Задача знакомит слушателей с основными протоколами обмена данными с СНС – NMEA, RINEX, GARMIN. В ходе выполнения слушатели должны освоить программирование потокового протокола NMEA и пакетного протокола GARMIN. Программирование ведется в системе MATLAB с использованием имеющихся в этой среде средств для работы с портами.

Оптимальное управление возмущаемой системой

Концепция практикума

Практикум знакомит слушателей с разными вариантами оптимального управления и видами возмущений, оказывающих влияние на движущийся объект. Подробно рассматриваются задачи об оптимальном подъеме метеорологической ракеты, задача Булгакова о максимальной ошибке инерциальной навигационной системы, задача минимаксной стабилизации возмущаемого маятника. Указанный практикум представляет собой переработанную версию практикума для студентов 4-го курса механико-математического факультета МГУ, обучающихся на кафедрах теоретической механики и мехатроники и прикладной механики и управления. Данная версия практикума допускает возможность дистанционного обучения студентов через INTERNET. Такая возможность позволяет организовать работу практикума на качественно новом уровне.

Сначала слушателям предоставляется возможность ознакомиться с основными сведениями из теории оптимального управления, которые в дальнейшем используются при решении конкретных задач – принцип максимума Понтрягина, задача Булгакова о максимальном отклонении, особые и неособые оптимальные управления и варианты их сопряжения и т.д.

Приведены постановки экстремальных задач для различных классов возмущений, ограниченных по величине и ограниченных по величине и производной.

Рассмотрен стохастический вариант задачи о максимальном отклонении.

Уделено внимание игровым постановкам задачи об уменьшении текущих отклонений в условиях противодействия возмущений, действующих на систему. Приведена форма принципа максимума для игровых задач при условии существования седловой точки игры.

Далее слушателям подробно демонстрируется применение рассказанной теории при решении конкретных задач оптимального управления.

Аннотации задач практикума

Задача об оптимальном подъеме метеорологической ракеты

Целью данного раздела практикума является знакомство с известной задачей прикладной теории оптимального управления – задачей вертикального подъема ракеты на максимальную высоту. Требуется определить закон изменения силы тяги двигателя, которая пропорциональна мгновенному расходу топлива, чтобы перевести ракету из заданного начального состояния на поверхности Земли в конечное состояние, когда вертикальная скорость обращается в нуль, а высота подъема наибольшая. Количество топлива является заданной величиной.

Рассматриваются три постановки этой задачи, различающиеся сложностью математических моделей и, соответственно, степенью учета физических факторов, влияющих на реальный процесс:

1. **Подъем ракеты в безвоздушном пространстве** – задачу о подъеме ракеты с ограниченным количеством топлива на максимальную высоту в предположении, что силой сопротивления среды можно пренебречь. Моделью движения ракеты служат уравнения движения точки переменной массы в однородном поле силы тяжести. Выписываются соотношения принципа максимума Понтрягина и доказывается отсутствие особых участков управления. Построен синтез оптимального управления. Слушателям предлагается построить собственный закон управления и сравнить его с оптимальным.

2. **Подъем ракеты в среде с постоянной плотностью.** В этом случае оптимальная программа расхода топлива может содержать режим особого управления, или режим промежуточной тяги. Возникновение особого режима связано с наличием среды, поскольку из-за силы сопротивления становится невыгодным (в смысле функционала качества) разгоняться до слишком высокой скорости. Слушателям предлагается построить поверхность особого управления, а также построить синтез оптимального управления при некоторых предположениях о параметрах задачи.

3. **Задача о подъеме ракеты с ограниченным количеством топлива на максимальную высоту в атмосфере с переменной плотностью.** Здесь, в отличие от второй задачи, считается, что плотность атмосферы меняется по экспоненциальному закону в зависимости от высоты, однако диапазон изменения высоты позволяет считать постоянным ускорение свободного падения. Слушатель должен найти структуру оптимального управления при монотонной зависимости сопротивления среды от скорости и высоты.

Задача Булгакова о максимальной ошибке инерциальной навигационной системы

Слушатель знакомится с принципом действия инерциальной навигационной системы (ИНС). При идеальной работе платформы и ньютонометра, а также отсутствия ошибок начальной выставки платформы система работает: платформа находится в плоскости горизонта и сигнал с вычислителя равен скорости движения объекта. Далее рассматриваются линейные уравнения в отклонениях, решение которых зависит как от начального положения (ошибок начальных условий), так и постоянно действующих возмущений (ошибок реализации угла поворота платформы и ошибок ньютонометров).

Информация о возмущениях в этой задаче неполная, известно лишь, что они принадлежат некоторому множеству. Поэтому для анализа точности работы ИНС необходимо решить задачу Булгакова о максимальном отклонении.

Как и в предыдущем случае, рассматриваются три постановки этой задачи, различающиеся используемыми математическими моделями возмущений:

1. **Задача о накоплении возмущений ИНС по одной координате.** Эта задача включает в себя несколько подзадач: поиск максимального отклонения от желаемого движения ИНС в конце процесса навигации при наличии только начальных возмущений; поиск ограниченного по модулю фиксированной величиной постоянно действующего возмущения, доставляющего максимальное отклонение от желаемого движения ИНС по одной координате; поиск ограниченного по модулю фиксированной величиной

постоянно действующего возмущения, имеющего ограниченную по модулю фиксированной величиной производную и доставляющего максимальное отклонение от желаемого движения ИНС по одной координате.

2. Задача о накоплении возмущений ИНС по двум координатам. В этой задаче функционал качества, оценивающий максимальное отклонение, равняется сумме квадратов отклонений по двум координатам. Сама задача ставится как поиск ограниченного по модулю фиксированной величиной постоянно действующего возмущения, доставляющего максимальное отклонение от желаемого движения ИНС по двум координатам. При этом требуется выполнить два задания: с помощью некоторой итерационной процедуры вычислить максимальное отклонение и соответствующее ему возмущение; построить аппроксимацию границы области достижимости.

3. Задача о накоплении возмущений ИНС по двум координатам при наличии случайных возмущений. Как и предыдущем пункте, в этой задаче функционал качества, оценивающий максимальное отклонение, равняется сумме квадратов отклонений по двум координатам. Одно из возмущений, действующих на систему, считается случайным процессом типа «белого шума» с заданной интенсивностью, а второе – ограниченной по модулю величиной. Задача снова ставится как поиск ограниченного по модулю фиксированной величиной постоянно действующего возмущения, доставляющего максимальное отклонение от желаемого движения ИНС по двум координатам. Требуется выполнить два задания: с помощью итерационной процедуры вычислить максимальное отклонение и соответствующее ему возмущение; найти эллипс рассеивания с доверительной вероятностью 0,989.

Задачи минимаксной стабилизации возмущаемого маятника

В порту находится корабль, на который нужно погрузить контейнер с ядовитыми отходами. Ставится задача управления перемещениями мостового крана, установленного на палубе корабля. Контейнер уже поднят с причала и перенесен на корабль, остается опустить его в трюм. Однако начальное отклонение гру-

за (контейнера) от вертикального положения и волнение моря, вызывающее вертикальные перемещения корабля и, следовательно, точки подвеса груза, приводят к колебаниям контейнера на тросе крана. Требуется стабилизировать колебания груза (иначе он проломит борт корабля) за время, не превосходящее заданного конечного T .

Контейнер рассматривается как материальная точка, подвешенная на гибкой нерастяжимой нити. Изучение движения ограничено вертикальной плоскостью. К точке подвеса приложена сила, имеющая две составляющие: горизонтальную (от управления краном) и вертикальную (возмущающую, вызванную волнением моря). Параметры системы таковы, что все движения носят колебательный характер. Поэтому задача рассматривается на полупериоде колебаний, результат может быть продолжен на следующий полупериод (с учетом нормировки).

Рассматриваются три постановки этой задачи:

1. Задача стабилизации при отсутствии возмущений. Возмущения на систему не действуют. Решается задача нахождения управления, максимально уменьшающего амплитуду колебания на полупериоде. Ответ получается на основе применения принципа максимума Понтрягина.

2. Задача экстремального роста амплитуды колебаний при отсутствии управления. Считается, что управление на систему не действует. Решается задача нахождения возмущения, максимально увеличивающего амплитуду колебания на полупериоде. Как и предыдущем случае, ответ получается на основе применения принципа максимума Понтрягина.

3. Дифференциальная игра при одновременном действии управления и возмущения. Решается задача нахождения возмущения, максимально увеличивающего амплитуду колебания на полупериоде, и управления, максимально уменьшающего эту же амплитуду, возникает дифференциальная игра. Показывается, что эта игра имеет седловую точку. Решение задачи снова получается на основе принципа максимума Понтрягина.

Тестирование качества управления аэрокосмическими объектами

Концепция практикума

Для выработки навыков управления сложными системами в экстремальных ситуациях, например управлении различного рода механизмами на орбитальной станции, управлении самолетом при больших перегрузках, действующих на пилота, очень важное значение получает повышение качества тренировок оператора (пилота) на различного рода стендах как динамических, так и компьютерных.

Современный уровень разработок динамических тренажеров предполагает наличие элементов искусственного интеллекта в системе управления таким стендом. В частности, предусматривается наличие системы тестирования качества выполнения заданий оператором при прохождении тренировки.

Для создания полноценного тренажера, требуется рассматривать гораздо более сложные задачи, включающие в себя не только маршевое движение, но и угловое. А для повышения реалистичности, необходимо имитировать не только визуальную обстановку вблизи космонавта, но и влияние невесомости на состояние самого космонавта. Этого частично можно добиться с помощью центрифуги, вызвав у космонавта вестибуло-сенсорный конфликт, а с помощью специального облачения добиться кровяного давления, соответствующего невесомости.

Оборудование

Для проведения практикума используются три графические станции с шлемами виртуальной реальности и компьютер с пониженным уровнем шума. Все они образуют локальную сеть под управлением сервера.

В качестве графического ядра используются библиотеки OpenGL и Direct3D, которые способны строить реалистичные изображения в реальном времени и поддерживаются большинством существующих видеокарт. Кроме того, библиотека OpenGL является платформенно независимой, что позволяет перенести программу визуального моделирования сближения космонавта со станцией на многие платформы, такие как Linux, Solaris, Irix,

Os/2, MacOS. На данный момент построена версия программы только под Windows с использованием DirectX 9.

Аннотации задач практикума

Данный практикум знакомит слушателей с методами тестирования работы систем управления аэрокосмическими объектами. На первом этапе тестирования производится выбор тестовых возмущений путем решения игровой задачи. Второй этап предполагает моделирование работы тестируемой системы управления. Когда в контур управления включен человек, для проведения тестирования необходимо обеспечивать динамическую и визуальную имитацию процесса управления. В задаче управления процессом сближения космического модуля с орбитальной станцией для повышения качества визуальной имитации используются шлемы виртуальной реальности и специальный поляризационный экран, позволяющий создать иллюзию объемного изображения. В состав практикума входит костюм – скафандр с регулируемым давлением воздуха в нижней половине. Это позволяет имитировать для космонавта-оператора условия, близкие к условиям управления объектом на орбите.

Список литературы

- 1 В.В. Александров, С.С. Лемак, Н.А. Парусников. Оптимизация динамики управляемых систем. М. Изд. Моск. ун-т 2000.
- 2 В.В. Александров, Л.Ю. Блаженова-Микулич, И.М. Гутьерес-Ариас, С.С. Лемак. Максимальное тестирование точности стабилизации и седловые точки в геометрических играх.
- 4 Е.В. Шикин, А.В. Боресков. Компьютерная графика. Полигональные модели. Изд. Диалог-МИФИ 2005.

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ

Общие положения

Новые информационные технологии инициируют развитие новых подходов к технологиям обучения. На кафедре прикладной механики и управления создана система компьютерного тестирования, основанная на технологиях Internet и «клиент-сервер». Первым курсом, на котором была опробована система тестирования, стал курс «Функциональный анализ и оптимальное управление движением». В дальнейшем планируется расширять список курсов, использующих компьютерную систему тестирования в качестве средства проведения промежуточной и итоговой аттестации. Одной из особенностей данной системы тестирования является возможность подключать к ней практические задачи.

В области использования компьютерных технологий в образовательных процессах разработано немало оригинальных методик, имеются разнообразные программные продукты. Развитие сетевых технологий предоставляет новые возможности и средства для разработки компьютерных обучающих систем. Дистанционная система компьютерного тестирования наряду с лекциями, семинарскими занятиями и самостоятельной работой (в том числе и с использованием методов дистанционного обучения, используемыми в системе тестирования) является составной частью программы подготовки специалистов в области механики управляемых систем.

Внедрение технологий Internet и «клиент-сервер» позволяет получить более гибкие средства как для создания и изменения материалов тестирования, так и их для использования. На кафедре прикладной механики и управления сделана система компьютерного тестирования, в которой создание и использование тестирующего материала является оперативным и гибким. Управление системой, процессы создания тестов и само тестирование реализуются с удалённых машин с использованием возможностей протокола HTTP для передачи запросов и данных.

Преимущества данного подхода заключаются в следующем: система компьютерного тестирования содержит возможность автоматизированной статистической обработки результатов тести-

рования: ранжирование оценок, сравнение характеристик групп испытуемых; автоматическая генерация большого числа вариантов теста с возможностью задания уровня сложности; при расположении баз данных на общедоступном сервере аудитория пользователей существенно увеличивается, существует возможность пополнения и обновления данных удаленным способом; возможен доступ к одному тесту неограниченного числа пользователей; наличие различных средств навигации в сети Internet предоставляет пользователю свободу выбора и освобождает от необходимости изучения специального программного обеспечения; имеется одна централизованная система управления материалом тестирования; доступ для администрирования осуществляется с любого компьютера, подключенного в локальную (глобальную) сеть; система тестирования не критична к платформе пользователя.

Ниже подробно рассмотрена концепция и задачи системы компьютерного тестирования по курсу «Функциональный анализ и оптимальное управление движением», в рамках которого будущие специалисты должны приобрести навыки решения прикладных задач механики управляемых систем.

Концепция системы компьютерного тестирования

В качестве платформы для системы компьютерного тестирования взята система дистанционного обучения MOODLE (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) – европейская система дистанционного обучения (СДО).

Данный программный продукт построен в соответствии со стандартами информационных обучающих систем.

Подсистема управления пользователями в MOODLE разработана с целью максимально возможной автоматизации работы администратора. Поддерживается ряд модулей аутентификации, позволяющих легко интегрировать MOODLE с существующими системами, возможна безопасная аутентификация через https. Среди основных модулей можно перечислить e-mail, LDAP, IMAP, POP3, NNTP аутентификации, аутентификация на основе внешней базы данных.

В системе MOODLE обеспечивается гибкое разделение прав доступа для различных пользователей. Пользователю может быть

назначена роль администратора, создателя курсов или обычного пользователя. На уровне курсов – роль преподавателя (с возможностью редактирования курса или без) и роль ученика. Регистрация на курсы может быть автоматизирована с помощью различных модулей и средств регистрации (Authorize.net, LDAP, PayPal, внешняя БД, текстовый файл, мета-курсы), может управляться непосредственно преподавателями.

Модуль тестирования в системе MOODLE имеет целый ряд преимуществ по сравнению с возможностями аналогичных по назначению программных средств, в частности, для нас имела большое значение наличие в ней как возможности пакетной загрузки тестов (наряду с ручной), так и выгрузки тестовых вопросов.

Учитывая открытость системы, в нее внесены необходимые для более эффективной ее эксплуатации дополнения и изменения.

Практические возможности компьютерной системы тестирования

Рассмотрим практические возможности использования MOODLE для проведения тестирования знаний студентов. Сами по себе преимущества электронного сетевого тестирования велики:

- ✓ отсутствие лишней бумажной работы преподавателя,
- ✓ облегчение его работы по проверке результатов,
- ✓ единообразию в тестировании, его однородности и объективности,
- ✓ отсутствие необходимости в дополнительном программном обеспечении.

В MOODLE используется 10 типов вопросов:

- ✓ Множественный выбор (закрытая форма тестового задания);
- ✓ Короткие ответы (открытая форма тестового задания);
- ✓ Числовой (с заданным интервалом предельно допустимой погрешности отклонения от правильного значения);
- ✓ Верно/Не верно;
- ✓ На соответствие;

- ✓ Вложенные ответы (тип, позволяющий объединять в одном тестовом задании произвольное количество ответов в закрытой и открытой форме);
- ✓ Случайный вопрос на соответствие;
- ✓ Случайный вопрос;
- ✓ Описание;
- ✓ Вычисляемый (системой генерируется набор исходных данных, для которой по заданной формуле вычисляется ответ).

Из перечисленных типов преподавателями наиболее часто используются закрытая и открытая формы и задания на соответствие.

Сама процедура тестирования в системе MOODLE отличается тем, что список вопросов теста можно выдавать полностью, с предоставлением тестируемому возможности возвращения к предыдущим вопросам и исправления ранее введенных ответов. Предусмотрен обучающий режим тестирования, когда за каждый повторный ответ начисляется заданный преподавателем штрафной балл. При использовании закрытой формы с множественным выбором, различным ответам могут быть присвоены разные веса. Вследствие этого, оценка за вопрос в целом может оказаться дробной в диапазоне от 0 до 1. Это позволяет существенно уменьшить вероятность получения положительной оценки случайным выбором вариантов ответа. В случае необходимости преподаватель может регламентировать время и количество попыток, отведенные студенту на прохождение теста. Особенности этапа обработки результатов тестов:

- ✓ шкала оценки задается при создании теста и может быть любой, в том числе, 5-бальной и 100-бальной. Кроме того выводится результат в процентах правильных ответов.
- ✓ в MOODLE существует механизм полуавтоматического пересчета результатов при корректировке преподавателем тестовых заданий после прохождения теста студентами.
- ✓ после завершения теста студенту могут быть сразу показаны правильные ответы, что, в частности, позволяет использовать систему форумов для апелляции результатов теста и выявления ошибок в базе вопросов.

- ✓ наличие в системе MOODLE развитых средств статистического анализа результатов тестирования и, что очень важно, сложности отдельных тестовых вопросов для тестируемых.

В частности, вычисляются следующие параметры:

- ✓ процент правильных ответов по конкретному вопросу, по величине которого можно судить о сложности данного вопроса для тестируемых. Статистическое стандартное отклонение полученных баллов от среднего значения в группе тестируемых;
- ✓ дискриминационный индекс служит индикатором способности конкретного вопроса разделять «сильных» и «слабых» студентов. Значения этого параметра лежат в диапазоне между -1 и $+1$. Его отрицательное значение служит поводом для отбраковки такого вопроса, так как означает, что на данный вопрос теста слабые студенты отвечают лучше, чем сильные;
- ✓ дискриминационный коэффициент – другая мера, позволяющая оценить качество вопроса. Он представляет собой коэффициент корреляции между баллами, полученными тестируемым по конкретному вопросу и его оценкой за прохождение всего теста. Отрицательное значение этого коэффициента также свидетельствует о некорректности анализируемого вопроса с точки зрения правильности оценки знаний.

На основе этих данных можно анализировать качество тестовых вопросов с точки зрения их эффективности для оценки знаний.

На кафедре прикладной механики и управления в 2006/2007 учебном году было проведено тестирование студентов, обучающихся по курсу «Механика управляемых систем». В общей сложности было протестировано 300 человек. Было отмечено, что функциональность модуля контроля знаний MOODLE получила высокие оценки преподавателей.

ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ПРОГРАММЫ

Дальнейшее развитие магистерской программы «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами» предполагает подготовку новых спецкурсов, задач физико-механического практикума, издание методических пособий по читаемым курсам и разработку элементов дистанционного обучения по указанной тематике. Предполагается включение в программу новых направлений.

Космический геомониторинг

В настоящее время на кафедре прикладной механики и управления МГУ начаты разработки систем пассивной и активной стабилизации малых ИСЗ, используемых в задачах геомониторинга. Современные устройства для геомониторинга, установленные на микроспутниках (ИСЗ), служат для разведки природных ископаемых и исследования процессов, происходящих в ионосфере, а также позволяют предсказывать различные виды катастроф и определять способы их устранения. Для их успешной работы требуется разработка надежной и дешевой системы стабилизации ИСЗ, позволяющей использовать узконаправленные антенны и перейти в гигагерцевый диапазон для создания высокоскоростных каналов передачи обрабатываемой спутником информации на Землю. Это требует решения задач выбора датчиков информации, надежных и дающих нужную точность; выбора малогабаритных исполнительных элементов, потребляющих минимальное количество энергии; выбора алгоритмов управления системой стабилизации.

Космическая робототехника

Данное направление связано с созданием роботов и робототехнических систем для исследования планет и других тел Солнечной системы. Для решения этой проблемы можно использовать как колесные, так и шагающие роботы. Весьма перспективным направлением являются разработки статически неустойчивых одноколесных и двухколесных аппаратов, обладающих повышенной проходимостью. Для автономных колесных роботов

повышенной маневренности на кафедре разрабатываются математические модели и макеты роботов с роликонесущими колесами и с тремя поворотными ведущими колесами. Последний тип роботов представляет систему с избыточным числом управлений. Для разрабатываемых роботов нужны различные системы технического зрения. На кафедре ведутся работы по созданию специальных видеосенсоров кругового обзора с гиперболическими зеркалами. Сенсорная и компьютерные многопроцессорные системы описанных роботов требуют разработки развитых алгоритмов интеллектуального управления, позволяющих ему решать разнообразные задачи планирования траекторий и управления в заранее неопределенной среде с различными препятствиями.

Биомеханика глазодвигательного аппарата

Во многих динамических объектах одним из звеньев в системе управления является человек-оператор, реализующий важные функции, обеспечивающие выполнение поставленной задачи. В случае, когда оператор находится на движущемся объекте, он оказывается подверженным динамическим факторам, сопутствующим движению.

Установлено, что такие факторы, как перегрузки, вибрации, шум, перепады давления и температуры, освещенности, отрицательно сказываются на состоянии оператора, и, главное, на его способности по управлению динамическим объектом.

По этой причине вопросы, связанные с моделированием динамических факторов полета, изучением особенностей их воздействия на организм человека, подготовкой и тренировкой операторов, изучаются на кафедре прикладной механики и управления уже более 30 лет.

Научная деятельность кафедры опирается на долговременное, надежное и взаимовыгодное сотрудничество с научно-исследовательскими институтами и предприятиями, работающими над этими проблемами. Необходимо упомянуть Институт медико-биологических проблем РАН, Центр подготовки космонавтов имени Ю.А.Гагарина, Институт военной медицины МО РФ, Московскую медицинскую академию имени И.М.Сеченова, научно-производственные объединения «Молния», «Ротор», «По-

лет», Центральный аэрогидродинамический институт имени Н.Е.Жуковского. Кафедра работает в тесном контакте ведущими мировыми научными центрами, например, с Массачусетским технологическим институтом, университетом города Пуэбла, медицинским университетом города Тулузы и другими. Это научное сотрудничество позволяет кафедре находиться на переднем крае научно-технического прогресса, дает возможность ставить эксперименты и участвовать в разработке современных тренажеров и стимуляторов. К примеру, в 2006-2007 годах в результате совместной работы кафедры и ИМБП РАН были разработаны техническое задание и конструкторская документация, а НПО «Полет» приступило к выпуску первого отечественного электро-вращательного кресла, обеспечивающего полный комплекс вестибулярной стимуляции испытуемых.

Студенты, магистранты и аспиранты кафедры активно участвуют в экспериментальной работе, поэтому их дипломные работы и диссертации имеют не только теоретическую, но и практическую ценность. В своей исследовательской работе они пользуются не только научным оборудованием кафедры и ее лабораторий, но и экспериментальной базой организаций – соисполнителей работ.

Объединение уникального экспериментального оборудования разных организаций, совместное проведение экспериментов, позволяет получать новые результаты, открывать неизвестные ранее явления.

Примером такого плодотворного сотрудничества является ряд экспериментов, проведенных совместно с ЦПК имени Ю.А. Гагарина. Для имитации факторов авиакосмического полета использовалась уникальная центрифуга ЦФ-18 (Asea, Швеция), а для регистрации движений глаз испытуемого – принадлежащая кафедре видеоокулографическая система (Ulmer, Франция).

В результате этой работы впервые изучается процесс адаптации вестибуло-глазодвигательных реакций космонавта к условиям земной гравитации, остро протекающий после возвращения из длительного орбитального полета. Проводятся уникальные эксперименты по моделированию воздействия боковых перегрузок на зрительную функцию человека.

ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ

Информация о магистерской программе «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами» доступна для ознакомления на официальном сайте инновационного образовательного проекта МГУ (<http://inpro.msu.ru>) в разделе **Реализация подпроектов → навигация и управление в космосе:**

http://inpro.msu.ru/index.php?cat=podproekt_13.

В данном разделе представлено описание магистерской программы «Алгоритмы навигации и управления аэрокосмическими объектами», ее состав и программы курсов, входящих в программу. Аналогичная информация размещена на сайтах:

✓ кафедры прикладной механики и управления механико-математического факультета МГУ <http://www.damc.msu.su>.

✓ лаборатория МОИДС отдела прикладных исследований – <http://moidc.math.msu.su>

✓ лаборатория управления и навигации отдела прикладных исследований – <http://www.navlab.ru>

Авторский коллектив: В.В. Александров, Т.Б. Александрова, Ю.В. Болотин, Д.И. Бугров, В.М. Буданов, Н.Б. Вавилова, А.В. Влахова, А.А. Голован, П.А. Кручинин, Н.В. Куликовская, С.С. Лемак, Ю.Г. Мартыненко, А.И. Матасов, В.М. Морозов, Н.А. Парусников, В.В. Тихомиров, А.Г. Якушев

Ответственные редакторы:

Александров Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики и управления механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией математического обеспечения имитационных динамических систем (МОИДС) отдела прикладных исследований МГУ;

Парусников Николай Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной механики и управления механико-математического факультета МГУ, научный руководитель лаборатории управления и навигации отдела прикладных исследований МГУ

Составитель:

Попеленский Михаил Юрьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории управления и навигации отдела прикладных исследований МГУ

Научное издание

**Инновационные образовательные программы
в области наук о космосе и околоземном пространстве**

Подписано в печать 28.11.2007 г.

Печать офсетная. Формат 64×94 1/16.

Гарнитура Times New Roman.

Объем 7,0 печатных листов. Тираж 1000 экз.

Ордена «Знак Почета» Издательство Московского университета.
125009, Москва, ул. Б. Никитская, 5/7.

Отпечатано в типографии ООО «ГЕО-ТЕК».
129110, Москва, Проспект Мира, д. 45, стр. 1, ООО «ГЕО-ТЕК»