

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Семинар по управлению движением и навигации космических аппаратов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

2 (весенний) - Зачет

3 (осенний) - Зачет

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 120 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 105 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Программу составил: Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, профессор по кафедре, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедре аэрофизической механики и управления движением 09.09.2024

## Аннотация

Изучение учебной дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистранта, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные теоретические понятия, концепции и подходы, используемые в проектировании оптимальных систем управления угловым движением космических аппаратов. Студенты знакомятся со специализированным математическим аппаратом, используемым в области разработки и эксплуатации систем управления движением и навигации космических аппаратов.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по проектированию оптимальных систем управления угловым движением космических аппаратов и сближением космических аппаратов (включая знакомство со специализированным математическим аппаратом) для использования в области разработки и эксплуатации систем управления движением и навигации космических аппаратов.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области проектирование оптимальных систем управления угловым движением космических аппаратов и сближением космических аппаратов;
- развить навыки постановки, анализа и решения задач по проектирование оптимальных систем управления угловым движением космических аппаратов и сближением космических аппаратов.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- общую классификацию исполнительных органов семинара по управлению движением и навигации;
- динамические уравнения движения космических аппаратов при ориентации и сближении;
- математическую постановку кинематической задачи оптимального управления;
- математическую постановку динамической задачи оптимального управления;
- математическую постановку задач оценки и идентификации.

уметь:

- видеть физическое содержание в задачах по оптимальным разворотам, управлению сближением;
- использовать информационные технологии и компьютерную технику для решения задач;
- использовать методы математического анализа для решения задач;
- использовать прикладной пакет «Matlab» для моделирования рассматриваемых задач.

владеть:

- культурой математической постановки задач, связанных с оптимальными разворотами и управлением сближением космических аппаратов;
- навыками самостоятельной работы;
- навыками работы с научной литературой по оптимальным разворотам и управлению сближением космических аппаратов.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Динамическая задача управления ориентацией космических аппаратов		8		12
2	Классификация исполнительных органов		7		8
3	Общая постановка задачи оптимального управления космическими аппаратами		8		9
4	Кинематическая задача оптимального управления		7		8
5	Оптимальное управление угловой скоростью		15		8
6	Управление ориентацией космических аппаратов с использованием реактивных двигателей		15		12
7	Управление ориентацией космических аппаратов с использованием инерционных исполнительных органов		15		12
8	Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическими аппаратами.		15		12
9	Управление линейными Multiple Input Multiple Output-системами		15		12
10	Управление сближением космических аппаратов		15		12
Итого часов			120		105
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Динамическая задача управления ориентацией космических аппаратов

Общая формулировка задачи управления динамическими системами. Обзор математических методов анализа и проектирования управления динамическими системами. Вывод динамических уравнений углового движения космических аппаратов, сближения космических аппаратов. Различные формы записи уравнений.

2. Классификация исполнительных органов

Реактивные, инерционные, магнитные, гравитационные исполнительные органы. Принципы работы и основные характеристики.

3. Общая постановка задачи оптимального управления космическими аппаратами

Обзор критериев качества, применяемых для различных исполнительных органов. Структурная схема динамического контура стабилизации. Декомпозиция общей задачи оптимального управления на три подзадачи: кинематическую задачу оптимального управления, задачу оптимальной стабилизации космических аппаратов по скорости.

4. Кинематическая задача оптимального управления

Общее решение кинематической задачи оптимального управления методом максимума Понтрягина. Обзор аналитических решений оптимального управления относительно инерциальной системы координат для частных случаев. Решение кинематической задачи оптимального управления во вращающейся системе координат.

5. Оптимальное управление угловой скоростью

Различные постановки и методы решения задачи оптимальной стабилизации. Задача оптимального управления по быстродействию. Задача оптимального управления по расходу рабочего тела.

6. Управление ориентацией космических аппаратов с использованием реактивных двигателей

Общая постановка задачи оптимального управления космическими аппаратами с использованием реактивных двигателей. Оптимальное управление по вектору кинетического момента. Вычисление потребного управляющего момента. Задача оптимального слежения за программной скоростью космического аппарата. Оптимальное управление N-мерной системой реактивных двигателей. Метод динамического программирования. Приближённые методы оптимального управления по квадратичному критерию. Управление в малом. Метод фазовой плоскости.

7. Управление ориентацией космических аппаратов с использованием инерционных исполнительных органов

Математические модели инерционных исполнительных органов (одноступенных исполнительных органов - маховиков и двухступенных исполнительных органов - гиродинов). Применение аналитических решений кинематической задачи при управлении на инерционных исполнительных органах (квазиоптимальное управление). Оптимальное управление N-мерной системой одноступенных исполнительных органов. Управление в малом. Исследование системы на устойчивость и управляемость.

8. Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическими аппаратами.

Инженерное приближение задачи оптимального управления космическим аппаратом с использованием аппарата решения задачи оценки и идентификации. Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическим аппаратом для инерциальных систем. Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическим аппаратом для вращающихся систем. Построение бортовых алгоритмов оптимального управления стабилизацией углового положения. Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическим аппаратом для вращающихся систем при наличии ограничений на значение угловой скорости вращения космическим аппаратом. Построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космическим аппаратом для инерциальных систем при наличии ограничений на значение угловой скорости вращения

#### 9. Управление линейными Multiple Input Multiple Output-системами

управление по состоянию линейными Multiple Input Multiple Output-системами

управление по выходу линейными Multiple Input Multiple Output-системами

управление по состоянию линейными дескрипторными Multiple Input Multiple Output-системами

управление по выходу линейными дескрипторными Multiple Input Multiple Output-системами

инвариантное управление линейными Multiple Input Multiple Output-системами

инвариантное управление линейными Multiple Input Multiple Output-системами на основе регуляризации.

#### 10. Управление сближением космических аппаратов

Совмещенный алгоритм терминального управления сближением космического аппарата с декартовой схемой двигательной установки

Совмещенный алгоритм терминального управления сближением космического аппарата с полярной схемой двигательной установки

Оценка параметров вектора состояния при сближении космического аппарата.

Быстрая схема сближения космического аппарата

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Математическая теория оптимальных процессов [Текст]/Л. С. Понтрягин [и др.], -М., Наука, 1983
2. Управление сближением космических аппаратов [Текст]/Ю. А. Ермилов, Е. Е. Иванова, С. В. Пантюшин, под ред. Е. П. Попова, -М., Наука, 1977
3. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела [Текст]/В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский, -М., Наука, 1973
4. Математическая теория оптимальных процессов [Текст]/Л. С. Понтрягин, -М., Наука, 1976

#### Дополнительная литература

1. Оптимальное управление [Текст]/М. Атанс, П. Фалб, -М., Машиностроение, 1968
2. Прикладная теория оптимального управления. Оптимизация, оценка и управление [Текст]/А. Брайсон, Хо Ю-Ши, пер. с англ. Э. М. Макашова, Ю. П. Плотникова под ред. А. М. Летова, -М., Мир, 1972
3. Управление ориентацией космических аппаратов [Текст]/Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь, -М., Наука, 1974

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), OpenOffice.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение спецкурса «Семинар по управлению движением и навигации космических аппаратов» требует систематических занятий и самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- изучение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам);
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к тестам и опросам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате опросов по рассмотренным темам.

Критерием качества владения материалом служит умение отвечать на вопросы по теме курса.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

2 (весенний) - Зачет

3 (осенний) - Зачет

**Разработчик:** Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, профессор по кафедре, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Семинар по управлению движением и навигации космических аппаратов» обучающийся должен:

### знать:

- общую классификацию исполнительных органов семинара по управлению движением и навигации;
- динамические уравнения движения космических аппаратов при ориентации и сближении;
- математическую постановку кинематической задачи оптимального управления;
- математическую постановку динамической задачи оптимального управления;
- математическую постановку задач оценки и идентификации.

### уметь:

- видеть физическое содержание в задачах по оптимальным разворотам, управлению сближением;
- использовать информационные технологии и компьютерную технику для решения задач;
- использовать методы математического анализа для решения задач;
- использовать прикладной пакет «Matlab» для моделирования рассматриваемых задач.

### владеть:

- культурой математической постановки задач, связанных с оптимальными разворотами и управлением сближением космических аппаратов;
- навыками самостоятельной работы;
- навыками работы с научной литературой по оптимальным разворотам и управлению сближением космических аппаратов.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль осуществляется в форме устного опроса на занятиях.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. вывод динамических уравнений углового движения космического аппарата, содержащего вращающиеся массы. Различные формы записи динамических уравнений
2. классификация исполнительных органов, принципы работы и основные характеристики



3. структурная схема динамического контура стабилизации
4. общее решение кинематической задачи оптимального управления методом максимума Понтрягина
5. обзор аналитических решений кинематически оптимального управления относительно инерциальной системы координат для частных случаев
6. задача оптимального по быстродействию управления угловой скоростью
7. задача оптимального по расходу рабочего тела управления угловой скоростью
8. общая постановка задачи оптимального управления космического аппарата с использованием функционала обобщенной работы
9. общая постановка задачи оптимального управления космического аппарата с использованием реактивных двигателей, подходы к решению
10. инженерное приближение задачи оптимального управления космического аппарата с использованием аппарата решения задачи оценки и идентификации
11. построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космического аппарата для инерциальных систем
12. построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космического аппарата для вращающихся систем
13. построение бортовых алгоритмов оптимального управления стабилизацией углового положения
14. построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космического аппарата для вращающихся систем при наличии ограничений на значение угловой скорости вращения
15. построение бортовых алгоритмов на основе инженерного приближения задачи оптимального управления космического аппарата для инерциальных систем при наличии ограничений на значение угловой скорости вращения
16. применение аналитических решений кинематической задачи при решении задач оптимизации вращения космического аппарата
17. управление в малом, исследование системы на устойчивость и управляемость
18. управление по состоянию линейными Multiple Input Multiple Output -системами
19. управление по выходу линейными Multiple Input Multiple Output -системами
20. управление по состоянию линейными дескрипторными Multiple Input Multiple Output -системами
21. управление по выходу линейными дескрипторными Multiple Input Multiple Output -системами
22. инвариантное управление линейными Multiple Input Multiple Output -системами
23. инвариантное управление линейными Multiple Input Multiple Output -системами на основе регуляризации.
24. совмещенный алгоритм терминального управления сближением космического аппарата с декартовой схемой двигательной установки
25. совмещенный алгоритм терминального управления сближением космического аппарата с полярной схемой двигательной установки
26. оценка параметров вектора состояния при сближении космического аппарата.
27. Быстрая схема сближения космического аппарата

#### Критерии оценивания

Студенту предлагается ответить на 2 вопроса, за каждый из которых выставляется от 0 до 5 баллов.

За ответ на каждый вопрос студент получает

- 5 баллов: ставится за полный, правильный и четкий ответ на вопрос
- 4 балла: ставится за полный и правильный ответ на вопрос. Допускаются отдельные нечёткости формулировок, опечатки в выписанных формулах, подсказки экзаменатора о необходимости поправить или дополнить ответ
- 3 балла: ставится за ответ на вопрос, содержащий ошибки или пропуски, но не содержащий грубых ошибок и существенных пропусков
- 2 балла: ставится за ответ на вопрос, содержащий грубую ошибку при ответе или при отсутствии ответа на одну из составляющих вопроса

- 1 балл: ставится за ответ на вопрос, содержащий грубые ошибки или пропуски при наличии в целом приемлемого ответа на хотя бы одну из составляющих вопроса
- 0 баллов: ставится за ошибочные или отсутствующие ответы на все составляющие вопроса

Итоговая оценка вычисляется как сумма баллов по каждому вопросу. Студенты, систематически посещавшие семинары и добросовестно выполнявшие задания, имеют преимущество в виде дополнительных 1-3 баллов к набранной сумме.

2-5 баллов: Зачет

0-1 баллов: Незачет

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Состав и порядок проведения зачета объявляется по крайней мере за неделю до зачета. При проведении зачета студенту предоставляется 1 час на подготовку. Во время проведения зачета студент не может пользоваться конспектами и любой другой литературой.