

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

---

**Утверждена**

Ученым советом

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

протокол № \_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Заместитель директора

\_\_\_\_\_ А.Л. Афенди́ков

(подпись, расшифровка подписи)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Механика управляемых движений

**Направление подготовки**

01.06.01– «Математика и механика»

**Профили (направленности программы)**

01.02.01 – «Теоретическая механика»

**Квалификация выпускника**

Исследователь. Преподаватель-исследователь

**Форма обучения**

очная

Москва, 2018

**Направление подготовки:** 01.06.01 – «Математика и механика»

**Профиль (направленность программы):** 01.02.01 – «Теоретическая механика»

**Дисциплина:** Механика управляемых движений

**Форма обучения:** очная

Рабочая программа составлена с учётом ФГОС ВО по направлению подготовки 01.06.01 – «Математика и механика», утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 866 (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 25 августа 2014 г. № 33837), и Программы-минимум кандидатского экзамена по общенаучной дисциплине 01.02.01 – «Теоретическая механика», утверждённой приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 08 октября 2007 г. № 274 (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 19 октября 2007 г. № 10363).

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

Боровин Г.К., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА**

Ученым советом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, протокол № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

-

**ИСПОЛНИТЕЛЬ** (разработчик программ):

Тучин А.Г., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, зав. сектором № 2 отдела № 5, д.ф.-м.н.

Заведующий аспирантурой \_\_\_\_\_ / Меньшов И.С. /

## Оглавление

АННОТАЦИЯ .....	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....	4
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
3.1. Структура дисциплины .....	5
3.2. Содержание разделов дисциплины .....	6
3.3. Лекционные занятия .....	6
3.4. Семинарские занятия .....	7
4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ.....	7
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	9
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	10

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Механика управляемых движений» реализуется в рамках Блока 1 Основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) по направлению подготовки 01.06.01 – «Математика и механика», направленность программы: 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Рабочая программа разработана с учётом требований ФГОС ВО по направлению подготовки 01.06.01 – «Математика и механика», утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 866 (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 25 августа 2014 г. № 33837), и Программы-минимум кандидатского экзамена по общенаучной дисциплине 01.02.01 – «Теоретическая механика», утверждённой приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 08 октября 2007 г. № 274 (зарегистрировано в Минюсте Российской Федерации 19 октября 2007 г. № 10363).

Основным источником материалов для формирования содержания программы являются: учебные издания, монографии, научные публикации, Интернет-ресурсы.

Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану составляет 2 ЗЕТ (72 часа), из них лекций – 4 часа, семинарских занятий – 10 часов, практических занятий – 0 часов, самостоятельной работы – 22 часа, контроль – 36 часов. Дисциплина реализуется на 1-м курсе, во 2-м семестре, продолжительность обучения – 1 семестр.

Текущая и промежуточная аттестация проводится не менее двух раз в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренными настоящей программой.

Итоговая оценка знания осуществляется в период зачётно-экзаменационной сессии в форме экзамена.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цели** освоения учебной дисциплины «Механика управляемых движений»:

- освоение теоретического материала дисциплины: определения, теоремы и их доказательства;
- формирование профессиональных компетенций, связанных с использованием методов и алгоритмов, изученных в рамках дисциплины, для решения прикладных задач.

**Задачи** освоения учебной дисциплины «Механика управляемых движений»:

- изучение методов управления динамическими системами и оценивания их состояния;
- овладение методами проектирования оптимальных систем управления;
- применение изученных методов и алгоритмов для решения задач, связанных с управлением космическими аппаратами.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Механика управляемых движений» направлен на формирование компетенций или отдельных их элементов в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 01.06.01 – «Математика и механика».

**а) универсальные (УК):** не предусмотрено

**б) общепрофессиональные (ОПК):** не предусмотрено

**в) профессиональные (ПК):**

- способность разрабатывать и исследовать теоретико-механические модели материальных систем (ПК-1);
- способность самостоятельно разрабатывать и исследовать математические модели механики робототехнических и мехатронных систем (ПК-2).
- Способность использовать основные понятия прикладной небесной механики (ПК-3)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

**Иметь представление:**

- об основных подходах к решению задач управления и оценивания;

**Знать:**

- основные определения: управляемость, наблюдаемость, стабилизируемость линейных систем;
- принципы инерциальной навигации и их реализацию;
- +математические модели управления космическими аппаратами;

**Уметь:**

- рассчитать параметры фильтра Калмана для оценивания состояния линейной системы;
- поставить и решить задачу оптимального управления;

**Владеть:**

- критериями управляемости и наблюдаемости;
- принципом максимума Понтрягина для решения задач оптимального управления;

**Приобрести опыт:**

- расчёта оптимального управления космическим аппаратом.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1. Структура дисциплины

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам учебных работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость	
	ЗЕТ	час.
Общая трудоёмкость по учебному плану	2	72
Лекции (Л)		4
Практические занятия (ПЗ)		0
Семинары (С)		10
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		22
Контроль		36
<i>Вид контроля: экзамен</i>		

### 3.2. Содержание разделов дисциплины

#### Общее содержание дисциплины

№ раздела	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)	Форма текущей аттестации
1.	Структурный анализ и линейный синтез управляемых систем	Управляемость линейных стационарных систем, критерии управляемости Калмана и Хаутуса. Канонический вид линейных систем. Наблюдаемость линейных стационарных систем, критерии наблюдаемости Калмана и Хаутуса. Стабилизируемость линейных систем. Управление по принципу обратной связи. Стабилизация по первому приближению.	О, ДЗ
2.	Оценивание состояния линейных систем	Оценивание состояния линейных систем. Наблюдатель полного порядка. Наблюдатель Люэнбергера. Фильтр Калмана. Совместная задача оценивания и управления.	О, ДЗ
3.	Инерциальная навигация	Общие принципы инерциальной навигации в космосе. Методы определения местоположения и ориентации объекта, движущегося в поле сил притягивающего центра. Уравнения ошибок инерциальной навигации и их свойства. Бесплатформенная инерциальная навигация.	О, ДЗ
4.	Оптимальное управление	Принцип максимума Понтрягина. Сопряжённые уравнения. Условия трансверсальности. Метод динамического программирования Беллмана. Связь принципа максимума с методом Беллмана. Задача оптимального быстрогодействия для линейных стационарных систем. Квадратичный критерий качества. Численные методы решения задач оптимального управления.	О, ДЗ
5.	Оптимальное управление космическими аппаратами	Упрощённые уравнения движения КА в скоростной системе координат при работающей двигательной установке. Тяга, удельная тяга, формула Циолковского. Оптимизация динамики управляемого полёта: задача о мягкой посадке с минимальным расходом топлива. Оптимизация динамики управляемого полёта: задача выставки. Оптимальная программа выведения КА на околоземную орбиту.	О, ДЗ

**Примечание:** О – опрос, Д – дискуссия (диспут, круглый стол, мозговой штурм, ролевая игра), ДЗ – домашнее задание (эссе и пр.). Формы контроля не являются жёсткими и могут быть заменены преподавателем на другую форму контроля.

### 3.3. Лекционные занятия

№ занятия	№ раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.	1	Управляемость линейных стационарных систем, критерии управляемости Калмана и Хаутуса. Канонический вид линейных систем. Наблюдаемость линейных стационарных систем, критерии наблюдаемости Калмана и Хаутуса. Стабилизируемость линейных систем. Управление по принципу обратной связи. Стабилизация по первому приближению.	2
2.	4	Принцип максимума Понтрягина. Сопряжённые уравнения. Условия трансверсальности. Метод динамического программирования Беллмана. Связь принципа максимума с методом Беллмана.	2
	<b>ВСЕГО</b>		<b>4</b>

### 3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.	2	Оценивание состояния линейных систем. Наблюдатель полного порядка. Наблюдатель Люэнбергера. Фильтр Калмана. Совместная задача оценивания и управления.	2
2.	3	Общие принципы инерциальной навигации в космосе. Методы определения местоположения и ориентации объекта, движущегося в поле сил притягивающего центра. Уравнения ошибок инерциальной навигации и их свойства. Бесплатформенная инерциальная навигация.	2
3.	4	Принцип максимума Понтрягина. Задача оптимального быстродействия для линейных стационарных систем. Квадратичный критерий качества..	2
4.	4,5	Численные методы решения задач оптимального управления. Упрощённые уравнения движения КА в скоростной системе координат при работающей двигательной установке. Тяга, удельная тяга, формула Циолковского.	2
5.	5	Оптимизация динамики управляемого полёта: задача о мягкой посадке с минимальным расходом топлива, задача выставки. Оптимальная программа выведения КА на околоземную орбиту.	2
	<b>ВСЕГО</b>		<b>10</b>

## 4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

**Текущая и промежуточная аттестация аспирантов.** Текущая аттестация аспирантов проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине проводится в форме опроса, а также оценки вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных контрольных мероприятиях по оцениванию фактических результатов обучения, осуществляемых преподавателем, ведущим дисциплину. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины см. ниже.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина: активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- степень усвоения теоретических знаний и уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы, проводимым в рамках семинаров, практических занятий и самостоятельной работы.

Оценивание обучающегося на занятиях осуществляется с использованием нормативных оценок по четырёхбалльной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

### Оценочные средства для текущей и промежуточной аттестации

Форма контроля знаний	Вид аттестации	Примечание
Опрос слушателей	текущая	Опрос по темам предыдущих занятий
Домашние задания	промежуточная	Подготовка рефератов

Список тем рефератов для **промежуточного контроля**:

1. Управляемость линейных стационарных систем.
2. Критерии управляемости Калмана и Хаутуса.
3. Канонический вид линейных систем.
4. Стабилизируемость линейных систем.
5. Управление по принципу обратной связи.
6. Стабилизация по первому приближению.
7. Принцип максимума Понтрягина.
8. Сопряжённые уравнения.
9. Условия трансверсальности.
10. Метод динамического программирования Беллмана.
11. Связь принципа максимума с методом Беллмана.

**Итоговая аттестация аспирантов.** Итоговая аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Итоговая аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена в период зачётно-экзаменационной сессии в соответствии с графиком учебного процесса по приказу (распоряжению заместителю директора по научной работе). Обучающийся допускается к экзамену в случае выполнения аспирантом всех учебных заданий и мероприятий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценивание обучающегося на итоговой аттестации осуществляется с использованием нормативных оценок на экзамене по четырёхбалльной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

#### **Оценивание аспиранта на итоговой аттестации в форме экзамена**

<b>Оценка</b>	<b>Требования к знаниям и критерии выставления оценок</b>
2 – неудовлетворительно	<ul style="list-style-type: none"><li>– Пробелы в знаниях или отсутствие знаний по значительной части основного учебного материала;</li><li>– основные задания, предусмотренные программой, не выполнялись самостоятельно;</li><li>– допущены существенные ошибки при ответе.</li></ul>
3 – удовлетворительно	<ul style="list-style-type: none"><li>– Владение основным объёмом знаний по дисциплине;</li><li>– затруднения в самостоятельных ответах;</li><li>– оперирование неточными формулировками;</li><li>– в процессе ответов допускаются ошибки по существу вопросов;</li><li>– способность решать лишь наиболее лёгкие задачи.</li></ul>
4 – хорошо	<ul style="list-style-type: none"><li>– Владение знаниями дисциплины почти в полном объёме</li></ul>



	<p>программы (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- самостоятельно и отчасти при наводящих вопросах даются полноценные ответы на вопросы билета;</li> <li>- умеет решать лёгкие задачи и задачи средней тяжести.</li> </ul>
5 – отлично	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного программного материала;</li> <li>- самостоятельное выполнение всех предусмотренных программой заданий,</li> <li>- глубокое освоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной программой,</li> <li>- проявление творческих способностей и научного подхода в понимании и изложении учебного программного материала.</li> </ul>

Ниже приведён примерный список вопросов для экзамена.

1. Управляемость линейных стационарных систем, критерии управляемости Калмана и Хаугуса. Канонический вид линейных систем.
2. Наблюдаемость линейных стационарных систем, критерии наблюдаемости Калмана и Хаугуса.
3. Стабилизируемость линейных систем.
4. Управление по принципу обратной связи.
5. Стабилизация по первому приближению.
6. Оценивание состояния линейных систем.
7. Фильтр Калмана.
8. Совместная задача оценивания и управления.
9. Принцип максимума Понтрягина.
10. Метод динамического программирования Беллмана.
11. Связь принципа максимума с методом Беллмана.
12. Задача оптимального быстрогодействия для линейных стационарных систем.
13. Общие принципы инерциальной навигации в космосе.
14. Методы определения местоположения и ориентации объекта, движущегося в поле сил притягивающего центра.
15. Уравнения ошибок инерциальной навигации и их свойства.
16. Бесплатформенная инерциальная навигация.
17. Упрощённые уравнения движения КА в скоростной системе координат при работающей двигательной установке. Тяга, удельная тяга, формула Циолковского.
18. Оптимизация динамики управляемого полёта: задача о мягкой посадке с минимальным расходом топлива.
19. Оптимизация динамики управляемого полёта: задача выставки.
20. Оптимальная программа выведения КА на околоземную орбиту.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### *Основная литература*

1. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 651 с.
2. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. – М.: Наука, 1966. – 530 с.
3. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 407 с.

### *Дополнительная литература и Интернет-ресурсы*

1. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М. Оптимальное управление движением. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 376 с.
2. Александров В.В., Лемак С.С., Парусников Н.А. Лекции по механике управляемых систем. – М.: Изд-во МГУ, 2012. – 240 с.
3. Алексеев В.М., Галеев Э.М., Тихомиров В.М. Сборник задач по оптимизации. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 256 с.
4. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 2005. – 384 с.
5. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
6. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа. 2003. – 614 с.
7. Брайсон А., Хо Ю-Ши Прикладная теория оптимального управления. Оптимизация, оценка и управление. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
8. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
9. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
10. Зеликин М.И. Оптимальное управление и вариационное исчисление. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 160 с.
11. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
12. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. – М.: Наука, 1978. – 488 с.

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Для чтения лекций и проведения семинаров требуется мультимедийная аудитория с проектором. Желательно наличие интерактивной доски.

**ИСПОЛНИТЕЛИ** (разработчики программы):

Тучин А.Г., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, зав. сектором № 2 отдела № 5, д.ф.-м.н.