

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

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

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Моделирование динамики сложных систем
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра перспективных технологий для систем безопасности
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: В.В. Акимов, phd

Программа обсуждена на заседании кафедры перспективных технологий для систем безопасности 31.03.2022

Аннотация

Процесс моделирования динамики сложных систем рассматривается как способ описания физических явлений, с одной стороны, и как средство анализа их поведения в задачах оптимизации и оптимального управления, с другой стороны. В первой части курса на примерах классических математических моделей вводятся понятия фракталов, бифуркаций и хаоса, излагаются ключевые элементы теории катастроф. В дальнейшем для описания дискретных систем привлекаются сведения из теории клеточных автоматов, уделяется внимание процессам кластеризации и перколяции и их роли в описании фазовых переходов. Во второй части основное внимание уделяется поведению сложных технических систем и концепции цифрового двойника. Рассматриваются модели динамических систем на графах, дается понятие сети Петри и цепи Маркова. Построение имитационных моделей сложных систем и анализ их поведения проводится с учетом современных стандартов их численного моделирования. В случае успешного освоения материала кратко излагаются основы методов оптимизации. В результате обсуждения различных аспектов поведения сложных динамических систем формируется не только целостное восприятие теории, но и вырабатываются практические навыки, необходимые для выполнения численных расчетов. Поскольку содержание курса имеет пересечение по темам с лекциями по линейной алгебре и дифференциальным уравнениям, по вычислительной математике и математической физике, предполагается знакомство слушателя с этими предметами. Темы, представленные на других курсах МФТИ, излагаются либо конспективно для уточнения терминологии, либо с других позиций для более полного освоения материала.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- сформировать компетенции в области численного моделирования динамики сложных систем и их эффективного использования в научно-исследовательской работе;
- выработать навыки построения математической моделей для основных типов динамических систем процессов и численного решения возникающих при этом задач;
- развить на практике навыки совместного выполнения научно-исследовательских проектов.

Задачи дисциплины

- дать основные определения и классификации методов математического моделирования динамики сложных систем;
- рассмотреть зависимость эффективности численного моделирования динамической системы от выбора метода построения математической модели;
- организовать в группе решение модельной задачи с разделением функций между участниками проекта.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности

	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные особенности и классификацию методов математического моделирования;
- базовые алгоритмы численного моделирования динамики сложных систем;
- основные принципы разработки и реализации задач численного моделирования динамики сложных систем.

уметь:

- разрабатывать математические модели исследуемых динамических систем;
- разрабатывать масштабируемые алгоритмы численного моделирования динамики сложных систем;
- эффективно реализовать масштабируемый алгоритм на выбранном языке программирования.

владеть:

- методами и средствами разработки математических моделей динамических систем;
- базовым навыком численного решения задачи математического моделирования динамической системы;
- навыками организации работы над решением научно-исследовательской задачи в группе.

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.

		лекции	семинары	лаборат. работы	работа
1	Основы моделирования динамики сложных систем	2		2	4
2	Фракталы и модели сложных систем	4		8	6
3	Аттракторы и поведение динамических систем	4		4	8
4	Клеточные автоматы и эволюция дискретной модели	4		4	6
5	Нелинейные динамические системы	2		12	8
6	Основные понятия теории сложных технических систем	4		2	4
7	Принципы и методы моделирования сложных систем	4		8	8
8	Программы и технологии моделирования сложных систем	4		8	8
9	Задачи численной оптимизации математической модели	2		12	8
Итого часов		30		60	60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Основы моделирования динамики сложных систем

Основные термины и понятия, а также свойства, параметры и характеристики сложных динамических систем. Модели сложных динамических систем и их примеры моделей нестационарных процессов со сложной динамикой.

2. Фракталы и модели сложных систем

Понятие о фрактале и его размерности. Геометрические и алгебраические фракталы. Губка Менгера, ковер Серпинского, снежинка Коха и канторова пыль. Множества Мандельброта и Жулиа. Примеры фрактальных множеств и их применения для описания поведения дискретных систем со сложной динамикой. Кластеризация и перколяция как модель фазового перехода. Анализ поведения сложных динамических систем.

3. Аттракторы и поведение динамических систем

Математическая модель нелинейной динамической системы: аттракторы, бифуркации, катастрофы. Аттрактор Лорентца. Понятие детерминированного хаоса и странного аттрактора. Отображение Пуанкаре.

4. Клеточные автоматы и эволюция дискретной модели

Понятие клеточного автомата. Примеры моделирования поведения сложных систем как клеточных автоматов. Классификация состояний.

5. Нелинейные динамические системы

Численное моделирование и особенности поведения нелинейных динамических систем. Вопросы лицензирования программного обеспечения.

6. Основные понятия теории сложных технических систем

Основные модели сложных систем и их классификация. Верификация и валидация модели, мера ее адекватности исследуемой сложной системе. Основы моделирования сложных технических систем; параметризация и критерии эффективности сложных систем. Имитационное моделирование и концепция цифрового двойника.

7. Принципы и методы моделирования сложных систем

Последовательное, параллельное и распределенное моделирование. Декомпозиция сложной модели и основные алгоритмы синхронизации ее частей. Имитационное моделирование на основе взаимодействующих автономных агентов и параллельное дискретно-событийное моделирование PDES (Parallel Discrete Event Simulation). Моделирование динамических систем на графах NBM (Network Based Modeling). Сети Петри и цепи Маркова. Системная динамика и объединение разнородных систем моделирования. Этапы моделирования сложных систем: постановка задачи, выбор метода, верификация, численный эксперимент и анализ результатов. Особенности моделирования сложных систем с непрерывным параметром; вопросы дискретизации и гладкости решений. Декомпозиция гибридных систем с нелинейной динамикой и выбор алгоритма синхронизации.

8. Программы и технологии моделирования сложных систем

Классификация, основные примеры, вопрос выбора. Архитектура высокого уровня HLA (High Level Architecture). Модели объектов федерации FOM (Federation Object Model) и процесса имитации SOM (Simulation Object Model). Спецификации интерфейсов и онтологии. Языки описания модели. Примеры прикладных программ для численных расчетов и имитационного моделирования сложных систем. Вопросы лицензирования программного обеспечения.

9. Задачи численной оптимизации математической модели

Построение модели, дискретизация расчетной области, выбор численного метода в условиях ограниченности вычислительных ресурсов, реализация модели на высокопроизводительных вычислительных системах.

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

Необходимое оборудование для лекций/лабораторных работ: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием: проектор, интерактивная доска,

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Айзерман М.А. Классическая механика. – М.: Наука, 2005.
- 2, Арнольд В.И. Теория катастроф. 3-е изд. доп. -М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1990.
3. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. -СПб.: Издательская группа BHV, 2004.
4. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика: Пер. с англ.—М.: Мир, 1984.
5. Малинецкий Г.Г., Сидоров С.В. Новые методы хаотической динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2004

Дополнительная литература

1. Агошков В.И. Методы оптимального управления и сопряженных уравнений в задачах математической физики. — М.: ИВМ РАН, 2003.
2. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. 3-е изд. доп. -М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1990.
3. Магницкий Н.А., Сидоров С.В. Новые методы хаотической динамики. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
4. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Едиториал УРСС, 2000.
5. Ряшко Л.Б., Башкирцева И.А. Регулярная и стохастическая динамика нелинейных систем. Учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009.
6. Таненбаум Э. Распределенные системы: принципы и парадигмы. — СПб: Питер, 2003.
7. Okan Topçu, Halit Oğuztüzün: Guide to Distributed Simulation with HLA // Simulation Foundations, Methods and Applications — Springer, 2017

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

1. Учебно-методические материалы: <http://www.science-education.ru/>
2. Учебные материалы: <http://ocw.mit.edu/>
3. Информационные материалы: <http://thesai.org>
4. Информационно-аналитические материалы: <http://researchpub.org/journal/cstij>

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

Для решения задач и реализации алгоритмов допускается использование лицензионного программного обеспечения по выбору студента. Рекомендуется использование языков программирования Python, MATLAB (Octave), C/C++, Java, Pascal.

Для оформления заданий допускается использование офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), Open/LibreOffice, Acrobat Reader, а также систем верстки документов на основе TEX.

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

Для успешного освоения дисциплины, помимо посещения лекций от студентов требуется выполнение самостоятельной работы. Объем самостоятельной работы должен быть не менее указанного для каждого раздела программы. В основном это время отводится на проработку материала лекций, а также на выполнения самостоятельной работы, которая учитывается при проведении текущего контроля усвоения материала.

Студенты, успешно прошедшие все формы текущего контроля, допускаются к сдаче экзамена.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется преподавателем, в результате индивидуальных консультаций.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Космические технологии
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
кафедра перспективных технологий для систем безопасности
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: В.В. Акимов, phd

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
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-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование динамики сложных систем» обучающийся должен:

знать:

- основные особенности и классификацию методов математического моделирования;
- базовые алгоритмы численного моделирования динамики сложных систем;
- основные принципы разработки и реализации задач численного моделирования динамики сложных систем.

уметь:

- разрабатывать математические модели исследуемых динамических систем;
- разрабатывать масштабируемые алгоритмы численного моделирования динамики сложных систем;
- эффективно реализовать масштабируемый алгоритм на выбранном языке программирования.

владеть:

- методами и средствами разработки математических моделей динамических систем;
- базовым навыком численного решения задачи математического моделирования динамической системы;
- навыками организации работы над решением научно-исследовательской задачи в группе.

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

Текущий контроль успеваемости осуществляется на основе тестирования и опроса студентов в ходе практических занятий, а также своевременного выполнения ими учебных заданий.

Примеры контрольных заданий:

1. Доклад по теме фракталы в природе и в научных исследованиях.
2. Доклад по теме клеточные автоматы как модель эволюции сложных систем.
3. Доклад по теме теория катастроф и особенности гладких отображений.
4. Обзор программ численного моделирования динамики сложных систем.
5. Доклад по методам решения нелинейных задач математической физики.
6. Доклад по методам имитационного моделирования сложных систем.
7. Обзор основных алгоритмов стохастической оптимизации.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных заданий, а также индивидуальных консультаций.

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

Промежуточная аттестация по дисциплине «Моделирование динамики сложных систем» осуществляется в форме экзамена (устного).

Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену:

1. Способы задания ориентации твердого тела в пространстве – углы Эйлера, матрица направляющих косинусов, кватернион конечного поворота.
2. Процедура преобразования систем координат (реализация перехода от связанной системы к неподвижной и обратно).
3. Приведение уравнения второго порядка к смешанной системе обычных дифференциальных уравнений первого порядка.
4. Основы метода Рунге-Кутты четвертого порядка решения систем дифференциальных уравнений.
5. Номенклатура и базовые (основные) свойства графических элементов.
6. Кинематика движения твердого тела с закрепленной точкой.
7. Кинематические уравнения в форме Эйлера и Пуассона.
8. Процедура «нормализации» матрицы направляющих косинусов, как средство поддержания точности вычислений в отсутствии данных внешней коррекции.
9. Динамика движения твердого тела с закрепленной точкой.
10. Динамические уравнения Эйлера.

Пример экзаменационных билетов:

Экзаменационный билет № 1

1. Классификация сложных динамических систем.
2. Имитационное моделирование на основе взаимодействующих автономных агентов.
3. Определение фрактальной размерности.

Экзаменационный билет № 2

1. Исследование динамики сложных систем. Аттрактор Лорентца.
2. Вопросы валидации моделей сложных систем.
3. Основные методы параметрической и топологической оптимизации.

Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется до 40 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Преподавателю предоставляется право, помимо теоретических вопросов студентам дополнительные вопросы, уточняющие понимание содержания курса.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций и любой другой литературой.

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и любой другой литературой.