

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>                           |
| <b>по дисциплине:</b>      | Нейросетевые технологии и робастная оптимизация в задачах аэродинамики |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Авиационные технологии   |
|                            | Физтех-школа авиационных и цифровых технологий                         |
|                            | кафедра аэрофизики и летательных аппаратов                             |
| <b>курс:</b>               | 2  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 30 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 1

Программу составил: Е.А. Дорофеев, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

## Аннотация

В курсе рассматриваются ключевые понятия теории искусственных нейронных сетей. Прежде всего строится теория искусственного нейрона, изучается его функциональность и возможные варианты его реализации. Далее изучаются различные варианты нейронных сетей, как направленных графов, узлами которых являются искусственные нейроны. Подробно изучается многослойный персептрон, RBF-сети, самоорганизующиеся карты Кохоннена, нейронные сети Хопфилда, сверточные нейронные сети глубокого обучения. Обсуждаются различные алгоритмы обучения нейронных сетей, прежде всего те из них, которые основаны на методе обратного распространения ошибки. Обсуждаются также методы, основанные на компьютерном отжиге и различные варианты генетических алгоритмов. Курс содержит в себе многочисленные примеры применения нейронных сетей в задачах аппроксимации сложных функциональных зависимостей, возникающих в прикладной аэродинамике, а также, при предварительном проектировании летательных аппаратов. Заключительная часть курса посвящена знакомству с методами анализа неопределенностей, возникающих в различных прикладных задачах и изучению методов оптимизации при наличии вероятностных критериев и ограничений.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- знакомство с теорией искусственных нейронных сетей, а также с многочисленными примерами применения нейросетевых технологий в задачах аппроксимации сложных функциональных зависимостей возникающих в прикладной аэродинамике а так же при предварительном проектировании летательных аппаратов. Предполагается также знакомство с теорией динамической ассоциативной памяти близко связанной с физикой неупорядоченных систем и теорией фазовых переходов. Вторая часть курса предполагает знакомство студентов с различными методами анализа неопределенностей, возникающих в различных прикладных задачах и изучение методов оптимизации при наличии вероятностных критериев и ограничений.

#### Задачи дисциплины

- научить студентов исходя из постановки соответствующих задач разрабатывать алгоритмы расчета; производить необходимый объем расчетов в соответствии с заданной точностью; представлять результаты расчетов в виде графиков, гистограмм и т.п.

### 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-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации               |
| 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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики, прикладной математики и теоретической и прикладной аэрогидромеханики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в механике сплошных сред и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем физико-математического моделирования.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современной вычислительной технике (распараллеливание задачи);
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций, уметь выделить главную часть и поставить корректную краевую задачу;
- планировать оптимальное проведение численного эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы на современном вычислительном оборудовании, знать современные языки программирования;
- математическим моделированием физических задач в рамках метода граничного элемента и сеточных методов.

#### 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           | Что такое нейронные сети.  |   | 2        | 2               | 5              |
| 2           | Процессы обучения. Обучение, основанное на коррекции ошибок.   |   | 2        | 2               | 6              |
| 3           | Однослойный персептрон. Теорема о сходимости персептрона.  |   | 3        | 3               | 6              |
| 4           | Многослойный персептрон. Алгоритм обратного распространения.   |   | 2        | 2               | 6              |
| 5           | Аппроксимация функций. Теорема об универсальной аппроксимации.   |   | 3        | 3               | 6              |
| 6           | Карты самоорганизации. Процесс конкуренции, процесс кооперации, процесс адаптации.                                   |   | 2        | 2               | 6              |
| 7           | Нейродинамика. Динамические системы.   |   | 2        | 2               | 6              |
| 8           | Статистическая механика модели Хопфилда.   |   | 2        | 2               | 6              |
| 9           | Фазовая диаграмма модели Хопфилда.   |   | 2        | 2               | 4              |
| 10          | Динамически управляемые рекуррентные сети.   |   | 2        | 2               | 5              |
| 11          | Анализ источников неопределенности в модели. Эмпирические функции распределения.                                     |   | 2        | 2               | 5              |
| 12          | Вероятностные критерии качества и теория надежности. Изовероятностные преобразования.                                |   | 2        | 2               | 4              |
| 13          | Оптимизация в условиях статистической неопределенности (робастная оптимизация) Функция потерь и функция вероятности. |   | 2        | 2               | 5              |
| 14          | Глубокое обучение (Deep Learning)  |   | 2        | 2               | 5              |
| Итого часов |  |   | 30       | 30              | 75             |

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Подготовка к экзамену | 0 час.              |
| Общая трудоёмкость    | 135 час., 3 зач.ед. |

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

Семестр: 3 (Осенний)

##### 1. Что такое нейронные сети.

Биологический нейрон. Человеческий мозг. Модели нейронов. Архитектура сетей. Представление знаний.

##### 2. Процессы обучения. Обучение, основанное на коррекции ошибок.

Обучение, основанное на коррекции ошибок. Обучение на основе памяти. Обучение Хебба. Конкурентное обучение. Обучение Больцмана. Обучение с учителем, обучение без учителя. Задачи обучения: ассоциативная память, распознавание образов, аппроксимация функций, управление, фильтрация. Память в виде матрицы корреляций.

##### 3. Однослойный персептрон. Теорема о сходимости персептрона.

Теорема о сходимости персептрона. Графики процесса обучения. Задача адаптивной фильтрации. Взаимосвязь персептрона и байесовского классификатора в гауссовой среде.

##### 4. Многослойный персептрон. Алгоритм обратного распространения.

Алгоритм обратного распространения. Два прохода вычислений, скорость обучения, последовательный и пакетный режимы обучения. Критерий останова. Перекрестная проверка.

##### 5. Аппроксимация функций. Теорема об универсальной аппроксимации.

Теорема об универсальной аппроксимации. «Проклятие размерности». Обучение с учителем как задача оптимизации. Метод сопряженных градиентов. Квазиньютоновские методы. Метод компьютерной заморозки. Генетический алгоритм.

##### 6. Карты самоорганизации. Процесс конкуренции, процесс кооперации, процесс адаптации.

Процесс конкуренции, процесс кооперации, процесс адаптации. Упорядочение и сходимость. Краткое описание алгоритма SOM.

##### 7. Нейродинамика. Динамические системы.

Динамические системы. Пространство состояний. Аттракторы. Управление аттракторами. Модель Хопфилда.

##### 8. Статистическая механика модели Хопфилда.

Метод реплик. Вычисление свободной энергии.

##### 9. Фазовая диаграмма модели Хопфилда.

Обобщения модели Хопфилда. Теория Е. Гарднер.

##### 10. Динамически управляемые рекуррентные сети.

11. Анализ источников неопределенности в модели. Эмпирические функции распределения.

Эмпирические функции распределения. Методы ядерного сглаживания. Стандартные одно- и многомерные функции распределения. Анализ корреляций. Графический анализ с помощью QQ- графиков. Оценки параметров. Хи-квадрат тест. Тестирование по Колмогорову-Смирнову. Принцип максимального правдоподобия. Байесовские информационные критерии.

12. Вероятностные критерии качества и теория надежности. Изобвероятностные преобразования.

Изобвероятностные преобразования. Преобразование Розенблата. Преобразование Натафа. Индекс надежности. Методы оценки надежности первого, второго и высших порядков (FORM, SORM, NORM). Методы пробных выборок. Различные разновидности метода Монте-Карло. Метод существенных выборок. Выборки направлений. Метод Латинского гиперкуба.

13. Оптимизация в условиях статистической неопределенности (робастная оптимизация) Функция потерь и функция вероятности.

Функция потерь и функция вероятности. Функция квантили. Методы детерминированного эквивалента. Билинейная функция потерь и сферически симметричные распределения. Функция потерь возрастающая по стратегии. Доверительный метод. Максимизация целевых функций на доверительном эллипсоиде. Стохастические квазиградиентные алгоритмы. Задачи стохастического программирования с вероятностным ограничением.

14. Глубокое обучение (Deep Learning)

Новая парадигма обучения. Обучение в два этапа. Автоассоциаторы. Информация о внутренней структуре входных данных. Многостадийное обучение с учителем (размеченными данными) стандартными методами.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

**6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Теория нейронных сетей [Текст]. Кн.1 : учеб. пособие для вузов / А. И. Галушкин .— М : Ред. журнала "Радиотехника", 2000 .— 416 с.
  2. Нейронные сети [Текст] : полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестова ; под ред. Н. Н. Куссуль .— 2-е изд., испр. — М. : Вильямс, 2006 .— 1103 с.
  3. Нейронные сети: история развития теории [Текст]. Кн. 5 : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А. И. Галушкина, Я. З. Цыпкина .— М. : ИПРЖР, 2001 .— 840 с.
  4. Оптимизация параметров многоцелевых летательных аппаратов [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / С. А. Пиявский, В. С. Брусов, Е. А. Хвилон .— М. : Машиностроение, 1974 .— 168 с.
- Фонд базовой кафедры
6. Ф. Уоссерман. Нейрокомпьютерная техника. Москва: Мир, 1992.
  7. А.Н. Горбань, Д.А. Россиев. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996.
  8. Измайлов А.Ф., Солодов М.И. Численные методы оптимизации. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

Дополнительная литература

1. Основы робастного управления (Н - теория) [Текст] : учебное пособие / А. С. Позняк ; Гос. ком. РСФСР по делам науки и высшей школы ; Московский физико-технический ин-т .— М. : МФТИ, 1991 .— 128 с.

Фонд базовой кафедры

5. Ф. Розенблат. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. Москва: Мир, 1965.

6. С.О. Мкртчян. Нейроны и нейронные сети. Москва: Энергия, 1971.

7. Г. Шеперд. Нейробиология. Тт. 1-2, Москва: Мир, 1987.

8. Ф.Блум, А.Лейзерсон, Л. Хофстедтер. Мозг, разум и поведение. Москва: Мир, 1988.

9. Кан Ю.С., Кибзун А.И. Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

## **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)**

на занятиях студенты используют программы Nuro Module 2.1 а также MatLab вместе с нейросетевым Tool Box.

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

Студент, изучающий дисциплину "Нейросетевые технологии и робастная оптимизация в задачах аэродинамики", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|   |  |
|---|--|
| <b>по направлению:</b>  | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b>  | Авиационные технологии<br>Физтех-школа авиационных и цифровых технологий<br>кафедра аэрофизики и летательных аппаратов |
| <b>курс:</b>  | <u>2</u>   |
| <b>квалификация:</b>  | магистр  |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет |  |
| <b>Разработчик:</b>   | Е.А. Дорофеев, канд. физ.-мат. наук, доцент  |

## 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-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации               |
| 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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники) |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Нейросетевые технологии и робастная оптимизация в задачах аэродинамики» обучающийся должен:

### знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики, прикладной математики и теоретической и прикладной аэрогидромеханики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в механике сплошных сред и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем физико-математического моделирования.

### уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современной вычислительной технике (распараллеливание задачи);
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций, уметь выделить главную часть и поставить корректную краевую задачу;
- планировать оптимальное проведение численного эксперимента.

### владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы на современном вычислительном оборудовании, знать современные языки программирования;
- математическим моделированием физических задач в рамках метода граничного элемента и сеточных методов.

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

1. Опишите алгоритмы обучения нейронных сетей RPROP.
2. Опишите составляющие нейронной сети.
3. Что такое нейронная сеть Хопфилда как ассоциативная память.
4. Теорема о приближении непрерывной функции линейной комбинацией сигмоидных функций.
5. Алгоритм обучения нейронных сетей ADAM
6. Процессы обучения.
7. Обучение, основанное на коррекции ошибок.
8. Обучение на основе памяти. Обучение Хебба.
9. Конкурентное обучение. Обучение Больцмана.
10. Обучение с учителем, обучение без учителя.
11. Задачи обучения: ассоциативная память, распознавание образов.

12. Аппроксимация функций, управление, фильтрация.
13. Многослойный персептрон.
14. Теорема Колмогорова. Аппроксимация функций.
15. Теорема об универсальной аппроксимации
16. Обобщающая способность многослойного персептрона.
17. «Проклятие размерности». Метод обратного распространения ошибки.
18. Алгоритмы обучения многослойного персептрона.
19. Условия остановки алгоритма обучения.
20. Явление переобучения.

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

1. Перцептрон
2. Алгоритмы обучения
3. Генетический алгоритм
4. Карты самоорганизации Кохоненна
5. Полносвязные нейронные сети
6. Применение нейросетевых методов в аэродинамике
7. Стандартные пакеты нейросетевых программ
8. Понижение размерности данных. Метод главных компонент.
9. Многослойный персептрон как репликатор.
10. Компрессор и декомпрессор.
11. Метод оценки внутренней размерности данных.
12. Сети на основе радиальных базисных функций (RBF).
13. Сравнение сетей RBF и многослойных персептронов.
14. Стратегии обучения. Случайный выбор фиксированных центров.
15. Выбор центров на основе самоорганизации. Выбор центров с учителем.
16. Карты самоорганизации. Процесс конкуренции.
17. Процесс кооперации, процесс адаптации.
18. Упорядочение и сходимость.
19. Краткое описание алгоритма SOM

#### **Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.