

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:  
декан физического факультета

С.Н. Филимонов

« 26 » июня 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

**Численные методы орбитальной динамики**

по направлению подготовки

**09.04.02 Информационные системы и технологии**

Направленность (профиль) подготовки:

**«Информационные системы и технологии в космической геодезии»**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистратура**

Год приема

**2023**

Код дисциплины в учебном плане: Б1.О.08

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

Бордова Т.В. Бордовицына

Председатель УМК

Сюсина О.М. Сюсина

Томск — 2023

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 — Способность разрабатывать оригинальные алгоритмы и программные средства, в том числе с использованием современных интеллектуальных технологий, для решения профессиональных задач;
- ОПК-7 — Способность разрабатывать и применять математические модели процессов и объектов при решении задач анализа и синтеза распределенных информационных систем и систем поддержки принятия решений;
- ПК-2 — Способность выполнять фундаментальные и прикладные работы поискового, теоретического и экспериментального характера для решения задач космической геодезии и геодинамики.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

- ИОПК-2.1. Владеет подходами в алгоритмизации и программирования численных методов орбитальной динамики
- ИОПК-2.2. Знает современные подходы, методы и технологии в области интеллектуального анализа данных для применения их в численном моделировании орбитального движения
- ИОПК-2.3. Умеет использовать методы современных интеллектуальных технологий для решения задач орбитальной динамики
- ИОПК-7.1. Знает классификацию орбитальных моделей и методов; уметь проводить анализ их применимости при решении задач орбитальной динамики
- ИОПК-7.2. Умеет разрабатывать орбитальные модели с использованием численных методов в решении задач орбитальной динамики
- ИОПК-7.3. Умеет применять численные методы для обработки измерительных данных информационных спутниковых систем
- ИПК-2.1. Знает методы работы с современными информационными спутниковыми системами
- ИПК-2.2. Умеет моделировать динамику спутниковых систем и использовать полученные математические модели для разработки методов решения задач геодинамики

## **2. Задачи освоения дисциплины**

- Ознакомить студентов с широко применяемыми на практике численными методами небесной механики и астродинамики;
- Развить навыки в реализации численных методов для решения прямых и обратных задач орбитальной динамики.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 1, экзамен.

Семестр 2, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 8 з.е., 288 часов, из которых

– лекции: 16 ч.;

– практические занятия: 48 ч.;

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Численное моделирование орбитального движения

Численные методы прямых и обратных задач орбитальной динамики. Численное моделирование. Эффективность численного моделирования.

Тема 2. Метод разложения в ряд Тейлора

Метод разложения в ряд Тейлора. Метод Стефенсона.

Тема 3. Методы Рунге–Кутты

Первые методы Рунге–Кутты. Явные методы Рунге–Кутты. Условия порядка. Оценка методической погрешности. Выбор величины шага интегрирования. Экстраполяция Рундсона. Вложенные методы Рунге–Кутты. Неявные методы Рунге–Кутты. Коллокационные методы. Методы Гаусса. Метод Эверхарта. Порядок и величина шага интегрирования при компьютерной реализации метода.

Тема 4. Экстраполяционные методы

Общий подход. Алгоритм Эйткена–Невилла. Метод Грегга–Булирша–Штера. Выбор величины шага интегрирования.

Тема 5. Многошаговые методы

Методы Адамса. Формулы дифференцирования. Реализация неявных методов. Схема предиктор–корректор. Линейные многошаговые методы. Условия порядка многошаговых методов. Устойчивость по Далквисту. Наивысший достижимый порядок для устойчивых методов. Оценка локальной погрешности. Формула Милна. Выбор величины шага интегрирования.

Тема 6. Геометрические методы

Уравнения гармонического осциллятора. Негеометричность методов Эйлера. Модифицированные методы Эйлера. Проекционный метод. Простые симплектические и симметричные методы. Метод Штермера–Верле. Методы Йошиды. Методы Гаусса и многошаговые методы как геометрические. Особенности в реализации симплектических методов.

Тема 7. Определение орбит из наблюдений

Обратная задача орбитальной динамики. Модельные представления наблюдений. Предварительное определение орбиты. Изохронные производные. Методы решения обратной задачи. Метод градиентного спуска. Метод Ньютона. Метод Гаусса–Ньютона. Демпфирование. Метод Левенберга–Марквардта. Овражные методы. Эффективность методов решения обратной задачи. Проблема неоднозначного определения орбит.

Тема 8. Оценивание параметрической точности

Задача наименьших квадратов, ее геометрия и доверительное оценивание. Стохастическое моделирование доверительной области и орбитальной неопределенности. Показатели нелинейности.

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости и выполнения практических задач, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Успешное выполнение практического задания является результатом освоения дисциплины по индикаторам ИОПК-2.1., ИОПК-2.3., ИОПК-7.2., ИОПК-7.3. и ИПК-2.2. В практическом задании необходимо программно реализовать один из рассмотренных в лекциях методов численного интегрирования орбит 8-го порядка с постоянным шагом: явный метод Рунге–Кутты; коллокационный метод Рунге–Кутты на разбиении Гаусса–Лобатто; экстраполяционный метод Грэгга–Булирша–Штера; многошаговый метод Адамса–Мульттона–Башфорта; геометрический метод Йошиды. Студенты должны написать код интегратора, провести тестирование и исследовать его эффективность в круговой задаче двух тел. Язык программирования выбирается по желанию студентов.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамены в первом и втором семестре проводятся в устной форме. В первом семестре студент допускается к экзамену, если он выполнил практическое задание. Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов по темам лекций (см. п. 8). Продолжительность экзамена 1.5 часа. На экзаменах проверяются результаты освоения дисциплины по индикаторам ИОПК-2.2., ИОПК-7.1. и ИПК-2.1. Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

### *Примеры билетов к экзамену*

#### **Билет № 1**

1. Численная модель орбитального движения
2. Метод разложения в ряд Тейлора

#### **Билет № 2**

1. Явные методы Рунге–Кутты. Вложенные методы
2. Практическая оценка погрешности метода Рунге–Кутты

#### **Билет № 3**

1. Неявные коллокационные методы Рунге–Кутты
2. Методы Гаусса. Интегратор Гаусса–Эверхарта

#### **Билет № 4**

1. Экстраполяционные методы
2. Метод Грэгга–Булирша–Штера

#### **Билет № 5**

1. Методы Адамса. Неустойчивость многошаговых методов
2. Выбор переменного шага в методах Адамса

#### **Билет № 6**

1. Геометрические методы Эйлера
2. Методы Штермера–Верле

#### **Билет № 7**

1. Симметричные методы
2. Методы Йошиды

#### **Билет № 8**

1. Предварительное определение орбит
2. Геометрия задачи наименьших квадратов

К промежуточной аттестации студент должен владеть следующей терминологией дисциплины (см. электронную версию лекций, а также монографию автора дисциплины и электронные образовательные ресурсы к дисциплине).

*Примерный перечень терминов*

1. Вектор динамического состояния
2. Гамильтониан
3. Гамильтониан модифицированный
4. Гамильтониан разделенный
5. Гармонический осциллятор
6. Главный член погрешности
7. Дисперсия ошибок
8. Дифференциально-алгебраические уравнения
9. Дифференциальное уравнение второго порядка
10. Дифференциальное уравнение первого порядка
11. Дифференциальные уравнения канонические
12. Задача двух тел
13. Задача Коши
14. Задача обратная
15. Задача прямая
16. Интеграл канонической системы
17. Интегратор Гаусса–Эверхарта
18. Интегрирование аналитическое
19. Интегрирование пошаговое
20. Интегрирование численное
21. Интерполяция Лагранжа
22. Интерполяция Ньютона
23. Интерполяция Эйткена–Невилла
24. Квадратура Гаусса
25. Квадратура Ньютона–Котеса
26. Корректор
27. Матрица Вандермонда
28. Метод Адамса
29. Метод Адамса–Башфорта
30. Метод Адамса–Мультона
31. Метод Гаусса–Эверхарта
32. Метод геометрический
33. Метод Гира
34. Метод Грэгга–Булирша–Штера
35. Метод Дормана–Принса
36. Метод Инглэнда
37. Метод Йошиды
38. Метод Кахана–Ли
39. Метод Куинлэна–Тремейна
40. Метод Кунцмана–Бутчера
41. Метод Мерсона
42. Метод многошаговый
43. Метод Накози
44. Метод Паркера–Сочаки
45. Метод прыгающих лягушек
46. Метод Рунге–Кутты вложенный
47. Метод Рунге–Кутты классический
48. Метод Рунге–Кутты коллокационный
49. Метод Рунге–Кутты неявный
50. Метод Рунге–Кутты сопряженный

Оценка промежуточной успеваемости студента формируется в соответствии с таблицей ниже.

#### Оценивание ответа студента на экзамене

Оценка	Критерий оценивания		
	Б	Д	З
5			
4			
3			

	Полный развернутый ответ или задача решена
	Неполный ответ
	Фрагментарный ответ
	Отсутствие ответа или задача не решена

Здесь Б — вопросы по билету; Д — дополнительные вопросы; З — задача; 5 — отлично; 4 — хорошо; 3 — удовлетворительно. Неудовлетворительная оценка соответствует всем иным случаям, не указанным в таблице.

#### 11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» — <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=32095>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

#### 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

- а) основная литература:
  1. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел. Издательский Дом Томского государственного университета. 2015.
- б) дополнительная литература:
  1. Hintz G. Orbital Mechanics and Astrodynamics. Springer. 2015
  2. Gurfil P., Seidelmann P.K. Celestial Mechanics and Astrodynamics: Theory and Practice. Springer. 2016.
  3. Veris A. Practical Astrodynamics. Springer. 2018.
  4. Montenbruck O., Gill E. Satellite Orbit. Springer. 2001.
- в) ресурсы сети Интернет:
  - <http://astro.tsu.ru/OsChMet/>
  - <http://astro.tsu.ru/ChIntODY/>
  - <https://ui.adsabs.harvard.edu>
  - Материально-информационная база Научной библиотеки ТГУ

### **13. Перечень информационных технологий**

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ — <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ — <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань — <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента — <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт — <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com — <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks — <http://www.iprbookshop.ru/>

### **14. Материально-техническое обеспечение**

- Аудитории для проведения занятий лекционного типа.
- Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.
- Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

### **15. Информация о разработчиках**

Авдюшев Виктор Анатольевич, д.ф.-м.н., Томский госуниверситет, профессор