

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
президиумом
Ученого совета ННГУ
протокол от
«14» декабря 2021 г. № 4

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки

03.03.03 «Радиофизика»

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

«Радиофизика и электроника»

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2022 год

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем» относится к дисциплинам по выбору (блок Б1.В.ДВ2) вариативной части основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» на радиофизическом факультете ННГУ, изучается в 7-м семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

Дисциплина обеспечивает приобретение знаний и умений исследования динамики нелинейных систем, содействует формированию мировоззрения и системного мышления. Цель преподавания дисциплины состоит в ознакомлении студентов с современными методами компьютерного анализа нелинейной динамики многомерных динамических систем, базирующихся на качественных методах теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций.

Задачи дисциплины:

- дать понятие о методах исследования нелинейных процессов динамических систем с непрерывным временем;
- ознакомить с системным подходом исследования нелинейных систем, основанных на методах качественной теории динамических систем и теории бифуркаций;
- дать основные сведения об алгоритмах и способах проведения вычислительного эксперимента при изучении нелинейной динамики многомерных систем;
- выработать навыки по созданию и использованию математических моделей для решения задач анализа и оптимизации нелинейных систем.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников) ОПК-1, ПК-2

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<i>ОПК3-</i> Способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности <i>этап освоения завершающий</i>	31 (ОПК-3). Знать методы и подходы решения задач изучения нелинейных динамических систем на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности. У1 (ОПК-3). Уметь применять методы изучения нелинейных динамических систем на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопас-

	ности. В1 (ОПК-3). Владеть аппаратом теории нелинейных колебаний на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ПК-2 способностью использовать основные методы радиофизических измерений <i>этап освоения завершающий</i>	32 (ПК-2). Знать методы радиофизических измерений, использующих знания теории нелинейных колебаний У2 (ПК-2). Уметь применять методы радиофизических измерений для анализа нелинейных колебательных процессов. В2 (ПК-2). Владеть методами радиофизических измерений нелинейных колебательных процессов.

3. Структура и содержание дисциплины «Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем»

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия практического типа, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)		В том числе								Самостоятельная работа обучающегося, часы	
			Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы									
			из них									
	Занятия лекционного типа		Занятия семинарского типа		Занятия лабораторного типа		Всего					
	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная
Исследование состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем и	12				6				6		6	

их бифуркаций.												
Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.	9				4				4		5	
Исследования нелинейных динамических моделей методом отображения Пуанкаре	8				4				4		4	
Исследование периодических движения многомерных динамических систем и их бифуркации.	10				4				4		6	
Исследование гомоклинических и гетероклинических бифуркаций динамических систем	9				4				4		5	
Странные аттракторы и способы их исследования	9				4				4		5	
Динамика конкретных динамических систем	14				6				6		8	
В т.ч.текущий контроль	2				2							
Промежуточная аттестация - Зачет												

Содержание разделов дисциплины

Раздел I. Состояния равновесия многомерных нелинейных динамических систем и их бифуркации. Практические алгоритмы изучения состояний равновесия: поиск координат состояний равновесия, определение их типа, вычисление бифуркационных значений параметров и построение бифуркационных кривых, алгоритмы вычисления первой

ляпуновской величины функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС (Динамика Нелинейных Систем).

Раздел II. Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций. Численные методы интегрирования систем ОДУ (одношаговые, многошаговые, жестких и стохастических систем), основные принципы построения программ численного интегрирования. Особенности представления фазовых траекторий динамических систем с цилиндрическим и тороидальным фазовыми пространствами. Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.

Раздел III. Метод отображений Пуанкаре, его роль при изучении непрерывных динамических систем. Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами. Технология исследования динамических систем путем численного построения отображения Пуанкаре. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Точечные отображения» и «Бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре» программного комплекса ДНС.

Раздел IV. Периодические движения многомерных динамических систем и их бифуркации. Практические алгоритмы изучения периодических движений: алгоритмы поиска периодических движений (методы простой итерации, секущих, Ньютона, сеток) и определения их типа (вычисление мультипликаторов), принципы построения бифуркационных кривых. Технология изучения периодических движений динамических систем с помощью функциональных модулей «Периодические движения» и «Бифуркационные кривые периодических движений» программного комплекса ДНС.

Раздел V. Гомоклинические и гетероклинические бифуркации динамических систем. Структура фазового и параметрического пространства в окрестности бифуркационных кривых, соответствующих гомоклиническим и гетероклиническим траекториям. Алгоритм построения бифуркационных кривых, соответствующих совпадению сепаратрис седловых состояний равновесия многомерных динамических систем. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Сепаратрисные связи» программного комплекса ДНС.

Раздел VI. Практические занятия по применению информационных технологий, базирующихся на методах теории нелинейных колебаний.

Текущий контроль успеваемости проходит в рамках занятий практического типа. Итоговый контроль осуществляется на зачете

4. Образовательные технологии

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме практических занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях практического типа:

- семинары с обсуждением учебного материала теоретического характера;
- практические занятия с использованием информационных технологий;
- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;

- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Используются виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах, с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе проведения аудиторных занятий и в конце курса при проведении зачета по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

Список контрольных вопросов:

1. Состояния равновесия многомерных нелинейных динамических систем и их бифуркации.
2. Практические алгоритмы изучения состояний равновесия.
3. Структура, функциональные возможности и правила работы программного комплекса LBER (Local Bifurcation Equilibrium Point) и функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС (Динамика Нелинейных Систем).
4. Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.
5. Численные методы интегрирования систем ОДУ.
6. Особенности представления фазовых траекторий динамических систем с цилиндрическим и тороидальным фазовыми пространствами.
7. Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.
8. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.
9. Метод отображений Пуанкаре, его роль при изучении непрерывных динамических систем.
10. Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами.
11. Технология исследования динамических систем путем численного построения отображения Пуанкаре.
12. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Точечные отображения» и «Бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре» программного комплекса ДНС.
13. Периодические движения многомерных динамических систем и их бифуркации.
14. Практические алгоритмы изучения периодических движений: алгоритмы поиска периодических движений и определения их типа, принципы построения бифуркационных кривых.
15. Технология изучения периодических движений динамических систем с помощью функциональных модулей «Периодические движения» и «Бифуркационные кривые периодических движений» программного комплекса ДНС.
16. Гомоклинические и гетероклинические бифуркации динамических систем.
17. Структура фазового и параметрического пространства в окрестности бифуркационных кривых, соответствующих гомоклиническим и гетероклиническим траекториям.

18. Алгоритм построения бифуркационных кривых, соответствующих совпадению сепаратрис седловых состояний равновесия многомерных динамических систем.
19. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Сепаратрисные связки» программного комплекса ДНС.
20. Странные аттракторы.
21. Способы и алгоритмы идентификации странных аттракторов в численном эксперименте.
22. Бифуркационные механизмы перехода к хаосу и метод идентификации их в численном эксперименте.
23. Методы и подходы выделения областей параметров, соответствующих хаотическому поведению динамической системы.
24. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Ляпуновские характеристические показатели» и «Спектры и автокорреляционные функции» программного комплекса ДНС.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, навыков), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

ОПК-3: Способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать методы и подходы решения задач изучения нелинейных динамических систем на основе информационных технологий	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей

<u>Умения</u> Уметь применять методы изучения нелинейных динамических систем на основе информационных технологий	Отсутствует способность решения стандартных задач	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач	Способность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	Способность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	Способность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
<u>Навыки</u> Владеть аппаратом теории нелинейных колебаний с использованием информационных технологий	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20–50%	50 – 70 %	70-80 %	80 –90%	90– 99%	100%

ПК-3: Владением компьютером на уровне опытного пользователя, способностью к применению информационных технологий

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать информ-	Отсутствие знаний мате-	Наличие грубых ошибок	Знание основного материала	Знание основного материала	Знание основного ма-	Знание основного ма-	Знание основного и

мацион- ные тех- нологии, бази- рующиеся на со- времен- ных ме- тодах ка- чествен- ной тео- рии не- линейных колеба- ний и теории бифурка- ций.	риала	в основ- ном ма- териале	с рядом негрубых ошибок	лом с ря- дом за- метных погреш- ностей	териала с незна- читель- ными погреш- ностями	териала без ошибок и по- грешно- стей	допол- нитель- ного ма- териала без ошибок и по- грешно- стей
<u>Умения</u> Уметь применять ин- формационные технологии, ба- зирующиеся на методах качественной теории нелиней- ных ко- лебаний и теории бифурка- ций для анализа физиче- ских яв- лений и процес- сов.	Отсутст- вует спо- собность решения стандарт- ных задач	Наличие грубых ошибок при ре- шении стан- дартных задач	Способ- ность ре- шения основных стандарт- ных задач с существ- ственными ошибками	Способ- ность ре- шения всех стандарт- ных задач с незна- читель- ными по- грешно- стями	Способ- ность решения всех стан- дартных задач без ошибок и по- грешно- стей	Способ- ность решения стан- дартных и неко- торых нестан- дартных задач	Способ- ность решения стан- дартных задач и широко- го круга нестан- дартных задач
<u>Навыки</u> Владеть информацион- ными технологиями, бази-	Полное отсутст- вие навы- ка	Отсут- ствие навыка	Владение навыком в мини- мальном объёме	Посред- ственное владение навыком	Доста- точное владение на- выком	Хоро- шее владе- ние на- выком	Всесто- роннее владе- ние на- выком

рующиеся на современных методах качественной теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20–50%	50 – 70 %	70-80 %	80 –90%	90– 99%	100%

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), либо решение задач и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Критерии оценок.

Зачтено	Обучающийся после подготовки с использованием конспекта лекций может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос, знает основные понятия и определения из материала дисциплины, может решить задачу из практических контрольных занятий.
Не зачтено	Студент после подготовки с использованием конспекта лекций не может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос, либо не знает основные понятия и определения из материала дисциплины, не может решить задачу из практических контрольных занятий.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих сформированность компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- устные и письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания

Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются: устный опрос, решение практических задач.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции

Примеры вопросов к зачету для оценки сформированности компетенций ОПК-3, ПК-2:

№	Вопрос	компетенция
1.	Классификация состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем	ОПК-3
2.	Бифуркации состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем	ОПК-3
3.	Классификация периодических решений многомерных нелинейных динамических систем	ОПК-3
4.	Бифуркации периодических решений многомерных нелинейных динамических систем	ОПК-3
5.	Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.	ОПК-3
6.	Практические алгоритмы изучения состояний равновесия.	ПК-2
7.	Структура, функциональные возможности и правила работы программного комплекса функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС	ПК-2
8.	Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.	ПК-2
9.	Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами	ПК-2
10.	Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Ляпуновские характеристические показатели» и «Спектры и автокорреляционные функции» программного комплекса ДНС.	ПК-2

Типовые задачи для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ОПК-3, ПК-2:

№	задание	компетенция
1.	Найти и определить тип состояния равновесия модели третьего порядка	<i>ОПК-3</i>
2.	Построить отображение Пуанкаре хаотического аттрактора	<i>ОПК-3</i>
3.	Измерить период и амплитуду периодических предельного цикла 2-го рода	<i>ПК-2</i>
4.	Вычислить мультипликаторы предельного цикла	<i>ОПК-3</i>
5.	Продемонстрировать бифуркацию удвоения периода периодического решения	<i>ПК-2</i>
6.	Построить фазовый портрет модели второго порядка	<i>ПК-2</i>
7.	Вычислить характеристики хаотического аттрактора	<i>ОПК-3</i>

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

1. Матросов В.В. Моделирование нейрноподобных элементов и сетей на базе фазоуправляемых генераторов. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2011.
<http://www.unn.ru/e-library/methodmaterial.html?pscience=7>
2. Матросов В.В. Динамика нелинейных систем. // Программный комплекс для исследования нелинейных динамических систем с непрерывным временем: учебно-методическая разработка Нижегородский Государственный Университет им. Н.И. Лобачевского, 2002.
http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual_matrosov_dns.PDF
3. Неймарк Ю. И. - Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1972. - 471 с.

б) дополнительная литература:

1. Пономаренко В. П., Матросов В. В. - Моделирование динамических процессов в автогенераторных системах с частотным управлением: учеб. пособие. - Н. Новгород: ННГУ, 1997. - 114 с.
2. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. -240с.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

- 8.1 Аудитория для практических занятий в группе
- 8.2 Компьютерный класс
- 8.3 Комплексы программ для ЭВМ:

- Программный комплекс «Динамика нелинейных систем»
- Программа ЭВМ для построения фазовых портретов и осциллограмм многомерных нелинейных динамических систем с непрерывным временем
- Программа ЭВМ для построения проекций отображения Пуанкаре многомерных нелинейных динамических систем с непрерывным временем

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 «Радиофизика».

Автор _____ Матросов В.В.

Рецензент _____ Осипов Г.В.

Заведующий кафедрой _____ Матросов В.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «09» декабря 2021 года, протокол № 07/21.