

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)

**Введение в теорию синхронизации**

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

**бакалавриат**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки** / специальность

**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 «Введение в теорию синхронизации» относится к дисциплинам по выбору вариативной части (блок Б1.В.ДВ1) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» (уровень бакалавриата) на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина изучается в 6-м семестре.

### Целями освоения дисциплины являются:

- освоение математических методов теории колебаний на примере задач теории синхронизации;
- знакомство с синхронизацией как универсальным явлением при взаимодействии нелинейных колебательных систем.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ОПК-2 способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии  этап освоения — базовый	32 (ОПК-2). Знать методы теории синхронизации, необходимые для приобретения новых знаний в области нелинейных колебаний и волн, математического моделирования, вычислительной биологии. У2 (ОПК-2). Уметь применять аппарат теории синхронизации, необходимый для дальнейшего изучения нелинейных колебательно-волновых явлений, математического моделирования, вычислительной биологии.
ПК-1  способность понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования  этап освоения — базовый	33-1 (ПК-1). Знать характеристики и особенности режимов сильного и слабого сигнала при вынужденной синхронизации. 33-2 (ПК-1). Знать основные математические модели систем автоматической синхронизации. 33-3 (ПК-1). Знать основные динамические режимы систем частотной и фазовой синхронизации. У3-1 (ПК-1). Уметь применять методы усреднения для анализа процессов вынужденной и взаимной синхронизации. У3-2 (ПК-1). Уметь выполнять анализ устойчивости синхронных режимов.

### 3. Структура и содержание дисциплины «Введение в теорию синхронизации»

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия семинарского типа, 1 час зачет), 75 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	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	
Понятие вынужденной и взаимной синхронизации. Нелинейный консервативный осциллятор с внешней периодической силой	12						4						4			8		
Автоколебательный осциллятор с внешней периодической силой	18						6						6			12		
Система автоматической синхронизации с частотной автоподстройкой	18						6						6			12		
Система автоматической синхронизации с фазовой автоподстройкой частоты	18						6						6			12		
Взаимная синхронизация двух автоколебательных осцилля-	16						4						4			12		

торов																		
Взаимная синхронизация в цепочке осцилляторов	16						4						4				12	
Хаотическая синхронизация	9						2						2				7	
В т.ч. текущий контроль	1						1						1					
Промежуточная аттестация - Зачет																		

#### 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 семинарских занятий.

**Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях семинарского типа:**

- доклады студентов по тематике занятия с последующим обсуждением.

#### 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

##### 5.1 Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

1. Понятие вынужденной и взаимной синхронизации
2. Нелинейный консервативный осциллятор с внешней периодической силой
  - a. Вывод укороченных уравнений
  - b. Нелинейный резонанс. Резонансные кривые
  - c. Устойчивость синхронного вынужденного колебания
3. Автоколебательный осциллятор с внешней периодической силой
  - a. Вывод укороченных уравнений
  - b. Резонансные кривые
  - c. Устойчивость и типы состояний равновесия укороченной системы
  - d. Режимы сильного и слабого внешнего сигнала и мультистабильности

- е. Характер перехода от синхронизации к биениям в режимах сильного и слабого сигналов
- 4. Система автоматической синхронизации с частотной автоподстройкой (ЧАП)
  - а. Блок-схема системы ЧАП, построение модели операторным методом
  - б. Динамика системы ЧАП с интегрирующим фильтром 1 порядка
- 5. Система автоматической синхронизации с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ)
  - а. Блок-схема системы ФАПЧ, построение модели операторным методом
  - б. Динамика системы ФАПЧ без фильтра (с «идеальным фильтром»)
  - в. Динамика системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром 1 порядка. Модель «кругового маятника с внешним моментом». Бифуркационная диаграмма. Фазовые портреты. Полосы захвата и удержания
  - г. Динамика системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром 1 порядка и разделительным фильтром высоких частот. Построение «склеенных» фазовых портретов для кусочно-линейной характеристики фазового дискриминатора. Режим импульсной синхронизации (квазисинхронизации)
- 6. Взаимная синхронизация двух автоколебательных осцилляторов
  - а. Вывод укороченных уравнений
  - б. Фазовое приближение, уравнения Курамото. Бифуркационная диаграмма для фазового приближения
  - в. Бифуркационная диаграмма синхронных режимов для полной системы укороченных уравнений без использования фазового приближения. Режимы синхронизации, биений и «осцилляторной смерти»
- 7. Взаимная синхронизация в цепочке осцилляторов
  - а. Вывод укороченных уравнений
  - б. Уравнения фазового приближения (Курамото). Уравнения синхронного режима в рамках фазового приближения, их решение. Частота синхронизации
  - в. Условие существования синхронного режима. Режим кластерной синхронизации
- 8. Хаотическая синхронизация
  - а. Точная хаотическая синхронизация
  - б. Обобщенная хаотическая синхронизация

## 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-2: способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.**

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать методы теоретической механики, необходимые для приобретения новых знаний в области теоретической физики, электродинамики, электроники.	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 аппарат теоретической механики, необходимый	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 по-	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных

для изучения теоретической физики, электродинамики, электроники.				ствиями	грешностей		задач
<u>Навыки</u> Владеть навыками использования математического аппарата теоретической механики, применяемого в теоретической физике, электродинамике, электронике.	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объёме	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-1 способность понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования.**

Индика-	Критерии оценивания (дескрипторы)
---------	-----------------------------------

торы компетенции	«плохо»	«не-удовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать формализмы Лагранжа и Гамильтона, методы отыскания интегралов движения.	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 получать и исследовать функции и уравнения Лагранжа и Гамильтона, исследовать малые (линейные) колебания и движение частиц в полях.	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 навыками составления функций Лагранжа и Гамильтона, отыскания интегралов дви-	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком



жения и их использования для понижения порядка уравнений; навыками отыскания нормальных колебаний и их частот в линейных системах; навыками анализа движения частиц в полях.							
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 экзамена, 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.

Экзамен проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в

рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

#### Критерии оценок

Зачтено	Студент после подготовки с использованием конспекта лекций может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос и выполнить задания, знает основные понятия и определения из материала дисциплины.
Не зачтено	Студент после подготовки с использованием конспекта лекций не может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос и выполнить задания, либо не знает основные понятия и определения из материала дисциплины.

#### 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 используются следующие процедуры и технологии:**

- практические контрольные задания

**Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются:** устный опрос, выполнение практических заданий.

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

#### **Вопросы к зачёту для оценки сформированности компетенций ОПК-2, ПК-1**

1. Вывод укороченных уравнений для нелинейного консервативного осциллятора с внешней периодической силой.
2. Резонансные кривые для нелинейного консервативного осциллятора с внешней периодической силой. Нелинейный резонанс.
3. Устойчивость синхронного вынужденного колебания для нелинейного консервативного осциллятора с внешней периодической силой.
4. Вывод укороченных уравнений для автоколебательного осциллятора с внешней периодической силой
5. Резонансные кривые для автоколебательного осциллятора с внешней периодической силой
6. Устойчивость и типы состояний равновесия в укороченной системе для автоколебательного осциллятора с внешней периодической силой

7. Режимы синхронизации осциллятора внешней периодической силой: режимы сильного и слабого сигнала и мультистабильности
8. Характер перехода от синхронизации к биениям в режимах сильного и слабого сигналов
9. Блок-схема системы ЧАП, построение модели операторным методом
10. Динамика системы ЧАП с интегрирующим фильтром 1 порядка
11. Блок-схема системы ФАПЧ, построение модели операторным методом
12. Динамика системы ФАПЧ без фильтра (с «идеальным фильтром»)
13. Динамика системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром 1 порядка. Модель «кругового маятника с внешним моментом». Бифуркационная диаграмма. Фазовые портреты. Полосы захвата и удержания
14. Динамика системы ФАПЧ с интегрирующим фильтром 1 порядка и разделительным фильтром высоких частот. Построение «склеенных» фазовых портретов для кусочно-линейной характеристики фазового дискриминатора. Режим импульсной синхронизации (квазисинхронизации)
15. Вывод укороченных уравнений для двух взаимодействующих автоколебательных осцилляторов.
16. Фазовое приближение и уравнения Курамото для двух взаимодействующих автоколебательных осцилляторов. Бифуркационная диаграмма для фазового приближения.
17. Бифуркационная диаграмма синхронных режимов для полной системы укороченных уравнений двух взаимодействующих автоколебательных осцилляторов (без использования фазового приближения). Режимы синхронизации, биений и «осцилляторной смерти»
18. Вывод укороченных уравнений для цепочки осцилляторов
19. Уравнения фазового приближения (Курамото) для цепочки осцилляторов. Уравнения синхронного режима в рамках фазового приближения, их решение. Частота синхронизации
20. Условие существования синхронного режима в цепочке осцилляторов в рамках фазового приближения.
21. Кластерная синхронизация
22. Точная хаотическая синхронизация
23. Обобщенная хаотическая синхронизация

### **Задания для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ОПК-2, ПК-1**

1. Исследовать явление нелинейного резонанса в нелинейном консервативном осцилляторе с внешней периодической силой методом усреднения (Ван-дер-Поля).
  - a. Вывести укороченные уравнения.
  - b. Построить резонансные кривые.
  - c. Исследовать синхронные вынужденные колебания на устойчивость.
2. Исследовать явление вынужденной синхронизации в автоколебательном осцилляторе с внешней периодической силой методом усреднения (Ван-дер-Поля).
  - a. Вывести укороченные уравнения.
  - b. Построить резонансные кривые.

- с. Исследовать состояния равновесия укороченной системы на устойчивость, определить их тип.
3. Исследовать динамику системы ЧАП с интегрирующим фильтром 1 порядка.
4. Исследовать динамику системы ФАПЧ без фильтра (с «идеальным фильтром»).
5. Вывести укороченные уравнения методом усреднения (Ван-дер-Поля) для взаимной синхронизации двух автоколебательных осцилляторов.
6. Вывести укороченные уравнения методом усреднения (Ван-дер-Поля) для взаимной синхронизации в цепочке осцилляторов.

#### **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. Вынужденная синхронизация. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2013.  
[http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual\\_matrosov\\_forced\\_sync.pdf](http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual_matrosov_forced_sync.pdf)
2. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: «Техносфера», 2003.

### **(б) Дополнительная литература**

3. Афраймович В.С., Некоркин В.И., Осипов Г.В., Шалфеев В.Д. Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации. – Горький: ИПФ АН СССР, 1989.  
<http://www.iapras.ru/biblio/haos.html>

### **(в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

4. Лекция Стивена Стrogатца «Наука о синхронизации» (Steven Strogatz, “The science of sync”) – видеоматериал (английский язык), стенограмма и субтитры (19 языков, включая русский)  
[http://www.ted.com/talks/steven\\_strogatz\\_on\\_sync/transcript?language=ru](http://www.ted.com/talks/steven_strogatz_on_sync/transcript?language=ru)
5. Опыт «Синхронизация метрономов» (видеоматериал)  
<http://www.youtube.com/watch?v=W1TMZASCR-I>  
<http://www.youtube.com/watch?v=JWToUATLGzs>

6. Опыт «Синфазная и противофазная синхронизация автоколебаний пламени» (видеоматериал)  
<http://www.youtube.com/watch?v=ndNBSgUd-vU>  
<http://www.youtube.com/watch?v=ld9KHCQ22-4>
7. Статья «Синхронизация вспышек светлячков» (на английском языке) и видеоматериал  
<http://phys.org/news197815725.html>

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Лекционные аудитории.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению радиофизика.

Автор \_\_\_\_\_ Канаков О.И.

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.