

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
радиотехники и компьютерных  
технологий**

**Д.А. Гаврилов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы цифровой обработки сигналов
<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий центр образовательных программ ФРКТ
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: Т.А. Тормагов, старший преподаватель

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФРКТ 08.11.2024

## Аннотация

В курсе лекций, читаемых студентам ФРКТ рассматриваются:

- теоретические основы цифровой обработки сигналов (ОЦОС), способы описания дискретных и цифровых сигналов и систем во временной,  $Z$  – и частотной областях, включая дискретное во времени преобразование Фурье, дискретное и быстрое преобразование Фурье;
- проведено практическое наполнение этих преобразований на многочисленных примерах, упражнениях и задачах
- основные методы преобразования аналоговых (в том числе полосовых) сигналов в цифровую форму;
- дискретизация случайных сигналов;
- интерфейс ввода- вывода для систем ЦОС реального времени;
- основные методы анализа и синтеза линейных цифровых фильтров;
- понятия о многоскоростных системах ЦОС

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение основ цифровой обработки сигналов (ЦОС).

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области цифровой обработки сигналов;
- приобретение теоретических знаний в области цифровой обработки сигналов, оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований ЦОС;
- приобретение навыков решения практических задач ЦОС.

## 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
	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
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.2 Владеет навыками реализации новых принципов и методов исследования в современных инфокоммуникационных системах и сетях
	ОПК-2.3 Владеет передовым отечественным и зарубежным опытом исследования современных инфокоммуникационных систем
ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.2 Способен системно анализировать полученную информацию, использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки и техники

ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и (или) участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ) ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия и методы цифровой обработки сигналов, математический аппарат анализа современных цифровых систем;
- экспериментальные основы реализации цифровых устройств.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач ЦОС;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки предельных параметров цифровых систем;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые области применения ЦОС, теоретические подходы и экспериментальные методики.
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками самостоятельной работы в избранном научно-техническом направлении.
- культурой постановки и моделирования задач ЦОС;
- навыками грамотной обработки результатов эксперимента и сопоставления с теоретическими данными;
- навыками освоения большого объема информации.

### 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	Дискретизация аналоговых сигналов. Решение задач	8			10
2	Дискретные преобразования Фурье. Решение задач	10			10
3	Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени. Решение задач	12			10
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

### 1. Дискретизация аналоговых сигналов. Решение задач

Сигналы и системы с дискретным временем.

Дискретизация аналоговых сигналов.

### 2. Дискретные преобразования Фурье. Решение задач

Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ).

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

### 3. Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени. Решение задач

Аналоговый интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени. Аналоговые фильтры защиты от наложения спектров.

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

Лекционная аудитория с проекционным оборудованием и доступом в сеть Интернет.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : в 3 ч. : учеб. пособие для вузов / Ю. Романюк ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., перераб. — М. : МФТИ, 2007 .— Ч. 1 : Свойства и преобразования дискретных сигналов. - 2007. - 332 с.
2. Дискретное преобразование Фурье в цифровом спектральном анализе [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Романюк ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. агентство по образованию, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2007 .— 120 с.
3. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко - СПб.Питер, 2006, 2007

### Дополнительная литература

1. Цифровая обработка сигналов [Текст] = Discrete-Time Signal Processing : [учеб. пособие для вузов] / А. Оппенгейм, Р. Шафер ; пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева .— 3-е изд., испр. — М. : Техносфера, 2012 .— 1048 с.
- Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. Мир 1990. — 584 с.

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

Видеолекции на сайте МФТИ <http://lectoriy.mipt.ru>

- Романюк Ю.А. «Основы цифровой обработки сигналов» в 2014г.
- Романюк Ю.А. «Цифровая обработка сигналов» в 2015г.

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

Программное обеспечение:

пакет прикладных программ MATLAB,

дистрибутив Anaconda для языка программирования Python 3,

пакет GNU Octave.

Онлайн-сервисы для компьютерного моделирования:

Google Colaboratory <http://colab.research.google.com/>,

MATLAB Online <https://www.mathworks.com/>.

Системы дистанционного обучения:

LMS Google Classroom (Система управления обучением),

Google Hangouts Meet (сервис видеоконференцсвязи).

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

Курс является лекционным, после каждой лекции предлагаются несколько практических задач для самостоятельного решения. Конспекты лекции по курсу регулярно публикуются на сайте кафедры <http://kprf.mipt.ru/> (раздел «Учебные курсы / Основы цифровой обработки сигналов»). Самостоятельная работа включает в себя решение задач, чтение рекомендованной литературы, подготовку к курсовой работе.

Для организации учебного процесса используется система управления обучением LMS Google Classroom, доступ осуществляется с помощью Google аккаунта в домене @phystech.edu. Обучающимся рекомендуется ознакомиться с учебными материалами на сайте кафедры <http://kprf.mipt.ru/> (разделы «Материалы / Лабораторные работы», «Учебные курсы / Дискретные преобразования сигналов», «Учебные курсы / Основы цифровой обработки сигналов»).

В том числе рекомендуем прочитать:

Цифровая обработка сигналов и Matlab: Курс лекций / Авторы Солонина А.И. и др. – СПб.: БХВ–Петербург, 2013

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий центр образовательных программ ФРКТ
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Т.А. Тормагов, старший преподаватель

## 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
	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
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.2 Владеет навыками реализации новых принципов и методов исследования в современных инфокоммуникационных системах и сетях
	ОПК-2.3 Владеет передовым отечественным и зарубежным опытом исследования современных инфокоммуникационных систем
ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.2 Способен системно анализировать полученную информацию, использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки и техники
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и (или) участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы цифровой обработки сигналов» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия и методы цифровой обработки сигналов, математический аппарат анализа современных цифровых систем;
- экспериментальные основы реализации цифровых устройств.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач ЦОС;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки предельных параметров цифровых систем;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые области применения ЦОС, теоретические подходы и экспериментальные методики.
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- навыками самостоятельной работы в избранном научно-техническом направлении.
- культурой постановки и моделирования задач ЦОС;
- навыками грамотной обработки результатов эксперимента и сопоставления с теоретическими данными;
- навыками освоения большого объема информации.

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

Текущий контроль по курсу «Основы цифровой обработки сигналов» проводится в виде двух контрольных работ и решения задач, предлагаемых на каждой лекции.

Контрольные работы проводятся одновременно для всех студентов. В семестре проводится две контрольные работы. Каждому студенту предлагается индивидуальный вариант контрольной работы, состоящий из трех задач по прочитанным лекциям.

Примеры вариантов контрольных работ.

Контрольная работа №1.

№1. Теоретический вопрос. Цифро-налоговое преобразование с запасом по частоте. Реализация в проигрывателях компакт-дисков.

№2. Сформулировать и доказать теорему об изменении масштаба для ДВПФ.

№3. Дана конечная последовательность  $x(k)$  в виде пяти отсчетов прямоугольного импульса.

- Найти и изобразить по модулю ДВПФ этой последовательности.
- Найти и изобразить по модулю ДВПФ для периодического повторения этой последовательности с периодом  $N=5$ .

Контрольная работа №2.

№1. Теоретический вопрос. Полосовой рекурсивный КИХ-фильтр. Передаточная функция, разностное уравнение, блок схема реализации. Импульсная и частотная характеристики.

№2. Определить отклик на единичный импульс и на дискретную функцию включения фильтра, разностное уравнение которого  $y(k) - 0,5y(k-1) = x(k)$ ,  $y(-1) = 0$ .

№3. Показать, что линейная фазочастотная характеристика фильтра соответствует полюсу или нулю передаточной функции  $H(z)$  при  $|z| < 1$ . Привести примеры.

2. Решение задач, предлагаемых на каждой лекции. Ежеженедельно студент представляет самостоятельное решение 2-3 задач (30-40 задач за семестр). Это могут быть аналитические решения, либо решения с цифровым моделированием (в MATLAB, Python).

Примеры задач.

№1. Фильтр описывается разностным уравнением  $y(k) - a y(k-1) = x(k)$ ,  $y(-1) = 0$ . Найти импульсную характеристику фильтра и определить условия устойчивости и физической реализуемости.

№2. Сформулировать и доказать теорему Котельникова в частотной области.

№3. В цифровых системах для  $N$ -точечной последовательности отсчеты спектральной функции  $X(v)$  в точках  $n\Delta v$ ,  $\Delta v = 1/N$ , совпадают с коэффициентами ДПФ  $X(n)$ . Показать, что для действительной последовательности  $x(k)$  инверсия спектра  $X(n)$  осуществляется путем простого изменения знака каждого второго отсчета  $x(k)$ .

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

- Идеальная дискретизация. Спектр дискретизованного сигнала.
- Представление сигналов рядами по функциям отсчетов. Теорема Котельникова (финитный и нефинитный спектры).
- Дискретизаторы с конечным временем выборки. Дискретизаторы с устройством выборки хранения и стробированием. Дискретизация с усреднением.
- Дискретизация синусоидальных сигналов. Эффект наложения.
- Дискретизация в частотной области.
- Комплексное представление колебаний. Преобразование Гильберта. Комплексная огибающая и ее спектр.
- Дискретизация полосовых радиосигналов.
- Дискретизация аналитического сигнала.



9. Квадратурная дискретизация. Формирования отсчетов квадратур из отсчетов узкополосного колебания. Интерпретация в частотной области
10. Субдискретизация полосовых радиосигналов, выбор частоты дискретизации. Субдискретизация полосовых сигналов с целочисленной полосой. Субдискретизация с квадратурной демодуляцией. Выбор частоты дискретизации.
11. Оценка спектра по дискретным отсчетам сигнала. Конечное число отсчетов. Явление Гиббса. Ядро Дирихле и ядро Фейера.
12. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ). Четыре формы записи ДВПФ. Основные спектральные теоремы и свойства ДВПФ.
13. Сходимость ДВПФ.
14. Восстановление сигнала по дискретным отсчетам. Идеальный и реальные фильтры восстановления.
15. Каузальная аппроксимация идеального фильтра нижних частот.
16. Фильтры Баттерворта и Чебышева.
17. Восстановление сигналов путем интерполяции. Кусочно-ступенчатая и кусочно-линейная интерполяция.
18. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Устройство выборки-хранения.
19. Характеристики квантователя при использовании округления и усечения.
20. Ошибка квантования. Статистические характеристики ошибки квантования.
21. Разрешающая способность АЦП. Динамический диапазон.
22. Применение АЦП с повышенной частотой дискретизации для упрощения аналогового фильтра защиты от наложения спектров (примеры).
23. Многоскоростная обработка.
24. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). ЦАП как НЧ фильтр.

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично (10)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены все 3 задачи в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях. За семестр каждому студенту (120 чел.) предлагается представить решения 20 задач.

Оценка "отлично (9)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены все 3 задачи в билете). Должны представлены решения не менее 15 (из предложенных 20) задач, предложенных на лекциях.

Оценка "отлично (8)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены все 3 задачи в билете с некоторыми недочетами). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "хорошо (7)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены 2 из 3-х задач в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "хорошо (6)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены 2 из 3-х задач в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "хорошо (5)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены 1,5 - 2 из 3 задач в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "удовлетворительно (4)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должны быть решены 1-2 из 3-х задач в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "удовлетворительно (3)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (должна быть решена 1 из 3-х задач в билете). Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

Оценка "неудовлетворительно (2)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (не решена ни одна из трёх задач в билете). Не представлены решения задач, предложенных на лекциях.

Оценка "неудовлетворительно (1)" 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. Главный критерий - результаты письменной работы в конце семестра (не решена ни одна из трёх задач в билете). Не представлены решения задач, предложенных на лекциях.

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

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

Экзамен проводится путем устного обсуждения написанной ранее письменной работы. Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.

## Экзаменационный билет.

### Основы цифровой обработки сигналов.

№1. Теоретический вопрос. Нерекурсивный фильтр 2-го порядка: передаточная функция, разностное уравнение, АЧХ, ФЧХ, импульсная и переходная характеристики.

№2. В цифровых системах для  $N$ -точечной последовательности отсчеты спектральной функции  $X(\nu)$  в точках  $n\Delta\nu$ ,  $\Delta\nu=1/N$ , совпадают с коэффициентами ДПФ  $X[n]$ . Показать, что для действительной последовательности  $x[k]$  инверсия спектра  $X[n]$  осуществляется путем простого изменения знака каждого второго отсчета  $x[k]$ .

№3. Определить отклик на единичный импульс и на дискретную функцию включения фильтра, разностное уравнение которого  $y[k] - 0,5y[k-1] = x[k]$ ,  $y[-1]=0$ .