

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

**УТВЕРЖДЕНО**

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

**А.В. Дворкович**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Цифровая обработка сигналов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии
	Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
	кафедра радиоэлектроники и прикладной информатики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: Ю.А. Романюк, канд. техн. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры радиоэлектроники и прикладной информатики 14.04.2020

## Аннотация

Целью курса является изучение теоретических основ цифровой обработки сигналов (ЦОС). Курс является годовым. В осеннем семестре рассматриваются разделы, связанные с способами описания дискретных и цифровых сигналов и систем во временной, частотной и  $Z$  – областях, основными методами преобразования аналоговых (в том числе полосовых) сигналов в цифровую форму, интерфейсами ввода-вывода для систем ЦОС реального времени. В весеннем семестре изучаются основы цифрового спектрального анализа, цифровой фильтрации, многоскоростной обработки сигналов. В ходе изучения курса обучающиеся знакомятся с особенностями цифрового спектрального анализа (окна, эффекты растекания и наложения), эффективным алгоритмом вычисления дискретного преобразования Фурье - быстрым преобразованием Фурье, цифровым спектральным анализом случайных последовательностей, цифровыми фильтрами с конечной и бесконечной импульсной характеристикой, основами многоскоростной фильтрации с применением децимации и интерполяции. Аудиторные задания по курсу проводятся в виде лекций, нацеленных на изучение теоретического материала и решение практических задач.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

изучение методов цифровой обработки сигналов (ЦОС).

#### Задачи дисциплины

- ☐ освоение студентами базовых знаний по методам ЦОС, относящимся к фундаментальным операциям – цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов.
- ☐ приобретение теоретических знаний в области цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов, 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-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
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:

- методы реализации фундаментальных операций ЦОС;
- цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов, многоскоростной обработки.

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 цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов в пакете программ MATLAB;
- 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	Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени. Решение задач.	5	5		
2	Дискретные преобразования Фурье. Решение задач.	5	5		
3	Дискретизация аналоговых сигналов. Решение задач.	5	5		15
4	Многоскоростная обработка сигналов. Решение задач.	5	5		2
5	Цифровая фильтрация сигналов. Решение задач.	5	5		2
6	Цифровой спектральный анализ (ЦСА) сигналов. Решение задач.	5	5		26
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени. Решение задач.

2. Дискретные преобразования Фурье. Решение задач.

Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ). Дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

3. Дискретизация аналоговых сигналов. Решение задач.

Сигналы и системы с дискретным временем. Дискретизация аналоговых сигналов

Семестр: 2 (Весенний)

4. Многоскоростная обработка сигналов. Решение задач.

Основы многоскоростной фильтрации с применением децимации и интерполяции, прореживания по времени и по частоте. Уменьшение частоты дискретизации (децимация). Увеличение частоты дискретизации (интерполяция). Принципы многофазной фильтрации. Банки фильтров. Практические конверторы скорости передачи данных. Применение многоскоростной обработки в цифровых аудиосистемах, цифровой связи, радиолокации.

5. Цифровая фильтрация сигналов. Решение задач.

Линейные дискретные фильтры. Разностные уравнения. Переход от преобразования Лапласа к  $z$ -преобразованию. Свойства  $z$ -преобразования. Примеры  $z$ -преобразования.  $Z$ -преобразование единичного импульса, единичного скачка, действительной и комплексной экспоненты, дискретной синусоиды и косинусоиды. Вычисление обратного  $z$ -преобразования. Уравнение цифрового фильтра в терминах  $z$ -преобразования. Импульсная и передаточная характеристики цифрового фильтра. Условие устойчивости при рекурсивной реализации. Примеры цифровых фильтров. Цифровой интегратор. Цифровой дифференциатор (простой). Трансверсальный фильтр.

Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Способы реализации. КИХ-фильтры с линейной фазовой характеристикой. Реализация кИХ-фильтров методом частотной выборки. Гребенчатый фильтр, его характеристики и реализация. Комплексные резонаторы, их характеристики и блок-схема реализации. КИХ-фильтры с целыми коэффициентами. Фильтр скользящего усреднения. Гребенка полосовых фильтров и ДПФ. Скользящий спектральный анализ. Высокоскоростная свертка с использованием БПФ. Цифровые фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры). Структуры БИХ-фильтров. Синтез БИХ-фильтров по методу билинейного  $z$ -преобразования. Устойчивость БИХ-фильтров. Алгоритм Герцеля рекурсивного вычисления подмножества отсчетов ДПФ. Адаптивные фильтры.

6. Цифровой спектральный анализ (ЦСА) сигналов. Решение задач.

Цифровой спектральный анализ (ЦСА) методом ДПФ. Временная и частотная оси ДПФ. Соответствие между ДПФ, рядом Фурье и непрерывным преобразованием Фурье. Связь ДПФ и ДВПФ. Интерполяционная формула восстановления ДВПФ по коэффициентам ДПФ. Интерполяция за счёт дополнения нулями. Интерполяция функций с ограниченной полосой с помощью ДПФ. Временная и частотная оси ДПФ. Два пути перехода от непрерывных к дискретным преобразованиям Фурье. Особенности цифрового спектрального анализа (ЦСА) методом ДПФ. Эффекты наложения, растекания, паразитной амплитудной модуляции. Окна при гармоническом спектральном анализе методом ДПФ. Примеры окон. Прямоугольное окно, окна Ханна и Хэмминга. Отклик ДПФ-анализатора на дискретный гармонический сигнал. Оценка спектра по дискретным отсчетам сигнала. Конечное число отсчетов. Явление Гиббса. Ядро Дирихле и ядро Фейера. Быстрое преобразование Фурье (БПФ). Алгоритм БПФ с составным основанием. Алгоритм БПФ с основанием 2. Алгоритмы БПФ с прореживанием по времени и по частоте. Алгоритмы БПФ с постоянной структурой. Вычисление обратного ДПФ.

ЦСА случайных последовательностей. Спектральные характеристики случайных сигналов. Спектральная плотность мощности (СПМ). Корреляционная функция. Теорема Винера-Хинчина. Непараметрические методы ЦСА. Методы периодограмм, корреляционный метод, метод фильтрации. Периодограмма с дискретным временем. Сглаживание оценки СПМ по методу Бартлетта, Уэлча. Выбор оконных функций.

Параметрические методы оценки СПМ временных рядов. Параметрические модели временных рядов: авторегрессионная (АР) модель, модель скользящего среднего (СС) и комбинированная модель авторегрессии – скользящего среднего (АРСС). Оценки параметров модели. Получение оценок СПМ. Сравнение оценок СПМ с истинной СПМ по точности и разрешению.

## **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. 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.

### **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.

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

1. 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.
2. Материалы на сайте FRTK.FIZTEH.RU (разделы: студентам – учёба – цифровая обработка сигналов).  
Материалы на сайте <http://frtk.ru/forstudents/study/studyMaterials/5kurs-DSP/>  
Материалы на сайте FRTK.FIZTEH.RU (разделы: студентам – учёба – 5 курс- цифровая обработка сигналов).

## **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 / Цифровая обработка сигналов»). Самостоятельная работа включает в себя решение задач, чтение рекомендованной литературы, подготовку к курсовой работе.

В том числе рекомендуем прочитать:

1. Цифровая обработка сигналов и Matlab: Учебное пособие. / Авторы Солонина А.И. и др. – СПб.: БХВ–Петербург, 2013 г..

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Космические технологии  
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий  
кафедра радиоэлектроники и прикладной информатики  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет  
2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Ю.А. Романюк, канд. техн. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
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 «Цифровая обработка сигналов» обучающийся должен:

### знать:

- методы реализации фундаментальных операций ЦОС;
- цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов, многоскоростной обработки.

### 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 цифровой фильтрации и спектрального анализа сигналов в пакете программ MATLAB;
- 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 годовому курсу «Цифровая обработка сигналов» проводится в виде четырех контрольных работ и решения задач, предлагаемых на каждой лекции.

1. Контрольные работы проводятся одновременно для всех студентов. В каждом семестре проводится две контрольные работы (всего четыре 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.

а) Найти и изобразить по модулю ДВПФ этой последовательности.

б) 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.

Контрольная работа №3.

№1. Теоретический вопрос. Биквадратный блок: прямая и каноническая формы; амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики; импульсная характеристика. Привести пример построения сложных канонических форм на основе биквадратного канонического блока.

№2. Рассмотреть БИХ-фильтр первого порядка, алгоритм цифровой фильтрации которого имеет вид  $y(k) = 2x(k) - 0,5x(k-1) + 0,5y(k-1)$ .

а) Найти передаточную функцию и импульсную характеристику фильтра.

б) Изобразить нуль-полосную диаграмму и блок-схему фильтра.

№3. КИХ-фильтр задаётся отсчётами импульсной характеристики:  $h(k)=2$  для  $0 \leq k \leq 5$  и  $h(k)=0$  для других  $k$ . Для рекурсивного и нерекурсивного способов реализации записать разностные уравнения, изобразить блок-схемы фильтра, определить передаточные функции, найти фазовую задержку.

Контрольная работа №4.

№1. Метод модифицированных периодограмм (метод Уэлча) для оценки спектральной плотности мощности.

№2. Непрерывный стационарный случайный сигнал обладает узкополосной спектральной плотностью мощности, равной нулю при  $|f| \geq 10$  кГц. На интервале в 10 с сигнал подвергается дискретизации с частотой 20 кГц, после чего спектральная плотность мощности оценивается методом усреднённых периодограмм Бартлетта.

а) Чему равна длина последовательности  $L$ ?

б) Какое число сегментов  $P$  будет иметь сигнал, если отдельные его участки не перекрываются?

№3. Построить граф БПФ с прореживанием по частоте для  $N=16$ . Указать все векторы поворота.

2. Решение задач, предлагаемых на каждой лекции. Ежеженедельно студент представляет самостоятельное решение 2-3 задач (30-40 задач за семестр, 60-80 задач за годовой курс). 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. Дано разностное уравнение цифрового фильтра нижних частот

$$y(k) = 0,1x(k) + 0,15x(k-1) + 0,05x(k-2) + y(k-1) - 0,25y(k-2).$$

Определить коэффициент передачи цифрового фильтра на нулевой частоте.

№5. Построить граф БПФ с прореживанием по времени для  $N=16$ . Указать все векторы поворота.

№6. Непрерывный стационарный случайный сигнал обладает узкополосной спектральной плотностью мощности, равной нулю при  $|f| \geq 10$  кГц. На интервале в 10 с сигнал подвергается дискретизации с частотой 20 кГц, после чего спектральная плотность мощности оценивается методом усреднённых периодограмм Бартлетта. При вычислении периодограмм используется алгоритм БПФ с основанием 2. Пусть длина сегментов сигнала совпадает с размерностью ДПФ и равна  $N$ . При каком наименьшем значении  $N$  расстояние между частотами, в которых вычисляется спектральная оценка, не превышает 10 Гц?

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи зачета в 9-ом семестре:

1. Идеальная дискретизация. Спектр дискретизованного сигнала.
2. Представление сигналов рядами по функциям отсчетов. Теорема Котельникова (финит-ный и нефинитный спектры).
3. Дискретизаторы с конечным временем выборки. Дискретизаторы с устройством выборки хранения и стробированием. Дискретизация с усреднением.
4. Дискретизация синусоидальных сигналов. Эффект наложения.
5. Дискретизация в частотной области..
6. Комплексное представление колебаний. Преобразование Гильберта. Комплексная огибающая и ее спектр.
7. Дискретизация полосовых радиосигналов.
8. Дискретизация аналитического сигнала.
9. Квадратурная дискретизация. Формирования отсчетов квадратур из отсчётов 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 отсчётов. 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. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). ЦАП как НЧ фильтр.

Перечень контрольных вопросов для сдачи магистерского экзамена в 10-ом семестре:

1. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Свойства и теоремы ДПФ.
2. Теорема о циклической свёртке.
3. Разбиение  $2N$ -точечного ДПФ на два  $N$ -точечных.
4. Матричная форма ДПФ.

5. Соответствие между ДПФ и рядом Фурье.
6. Соответствие между ДПФ и непрерывным преобразованием Фурье.
7. Связь ДПФ и ДВПФ.
8. Интерполяция добавлением нулевых отсчётов.
9. Интерполяция функций с ограниченной полосой с помощью ДПФ.
10. Временная и частотная оси ДПФ.
11. Особенности спектрального анализа методом ДПФ.
12. Особенности применения окон при спектральном анализе методом ДПФ.
13. Прямоугольное окно. Треугольное окно (окно Бартлетта).
14. Окна Ханна и Хэмминга.
15. Выбор оконных функций при спектральном анализе сигналов.
16. Конструирование оконных функций.
17. Алгоритмы вычисления ДПФ.
18. Быстрое преобразование Фурье.
19. Алгоритм БПФ с составным основанием.
20. Алгоритмы БПФ с основанием 2.
21. Спектральный анализ в точках z-плоскости. Алгоритм Герцеля.
22. Спектральный анализ случайных последовательностей методом ДПФ.
23. Метод периодограмм оценки спектральной плотности мощности (СПМ).
24. Метод Бартлетта сглаживания оценки СПМ.
25. Метод модифицированных периодограмм (метод Уэлча).
26. Корреляционный метод оценки СПМ.
27. Применение z-преобразования в обработке сигналов.
28. Линейные дискретные фильтры. Разностные уравнения.
29. Уравнение цифрового фильтра в терминах z-преобразования.
30. Импульсная и передаточная характеристики цифрового фильтра. Условие устойчивости.
31. Примеры цифровых фильтров. Цифровой интегратор. Цифровой дифференциатор (простой). Трансверсальный фильтр.
32. Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры).
33. Рекурсивный метод реализации КИХ-фильтров. Метод частотной выборки
34. КИХ-фильтры с линейной фазовой характеристикой.
35. Цифровые фильтры бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтры).
36. Адаптивные цифровые фильтры.
37. Многоскоростная обработка сигналов.
38. Принципы уменьшения частоты дискретизации (децимация).
39. Принципы увеличения частоты дискретизации (интерполяция).
40. Принципы многофазной фильтрации.
41. Практические конверторы скорости передачи данных.
42. Применение многоскоростной обработки в аудиосистемах.
43. Применение многоскоростной обработки в цифровой связи.

#### Критерии оценивания

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 зачёта и экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций. Зачёт и экзамен проводятся путем устного обсуждения написанной ранее письменной работы. Учитывается количество и качество решений задач, предложенных на лекциях.