

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям

О.И. Чуприс

«12» августа 2019 г.

Регистрационный № УД- 8702 /уч.



Прикладные методы цифровой обработки сигналов

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 03 01 Математика (по направлениям)

Направление специальности

1-31 03 01-04 Математика (научно-конструкторская деятельность)

2019 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 03 01-2013 и учебного плана
(регистрационный номер G31-209/уч. от 29.05.2015.

СОСТАВИТЕЛЬ:

М. И. Вашкевич, доцент кафедры математической кибернетики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат технических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТ:

И.С. Азаров, заведующий кафедрой электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой математической кибернетики механико-математического факультета Белорусского государственного университета
(протокол № 10 от 03.05.2019);

Научно-методическим Советом Белорусского государственного университета
(протокол № 5 от 28.06.2019)

Зав. кафедрой математической кибернетики _____ **А.Л.Гладков**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель дисциплины «Прикладные методы цифровой обработки сигналов» - научить студентов владеть теоретическими основами и практическими навыками цифровой обработки сигналов, которые включают знание особенностей и границ применимости различных методов анализа сигналов, понимание процесса перехода от непрерывного к дискретному представлению сигнала, знанию базовые преобразования сигналов, методов проектирования и реализации цифровых фильтров.

Образовательная цель: изложение основных принципов частотного анализа сигналов, а также методов проектирования, анализа и реализации цифровых фильтров.

Развивающая цель: дальнейшее формирование у студентов математического мышления, навыков построения практических систем цифровой обработки сигналов.

Воспитательная цель: формирование у студентов математической культуры, стремления к совершенствованию знаний в области цифровой обработки сигналов и использованию их для решения актуальных социальных и технических проблем современного общества.

Задачи учебной дисциплины:

1. Показать место цифровой обработки сигналов в системе математического знания и потенциал её применения в науке, производстве и информационных технологиях.

2. Подготовить будущих специалистов по математике и информационным технологиям к использованию прикладных методов цифровой обработки сигналов на практике.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием:

Учебная дисциплина относится к циклу дисциплин специализаций компонента учреждения высшего образования.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Дисциплина «Прикладные методы цифровой обработки сигналов» связана с дисциплинами «Основы цифровой обработки сигналов», «Алгебра» и «Дискретная математика».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Прикладные методы цифровой обработки сигналов» должно обеспечить формирование следующих *академических, социально-личностных и профессиональных* компетенций:

академические компетенции:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом;
АК-3. Владеть исследовательскими навыками;
АК-4. Уметь работать самостоятельно;
АК-5. Быть способным порождать новые идеи;
АК-8. Обладать навыками устной и письменной коммуникации;
АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение жизни;

социально-личностные компетенции:

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию;
СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям;
СЛК-5. Быть способными к критике и самокритике;

профессиональные компетенции:

ПК-1. Разрабатывать практические рекомендации по использованию научных исследований, планировать и проводить экспериментальные исследования, исследовать патентоспособность и показатели технического уровня разработок программного обеспечения информационных систем.

ПК-5. Заниматься аналитической и научно-исследовательской деятельностью в области математики и информационных технологий.

ПК-8. Работать с научной, нормативно-справочной и специальной литературой;

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- процесса перехода от непрерывного к дискретному представлению сигнала;
- особенности частотного анализа дискретных, непрерывных, периодических и апериодических сигналов;
- быстрые алгоритмы дискретного преобразования Фурье (БПФ);
- основы анализа дискретных сигналов при помощи z-преобразования;
- основные этапы проектирования и реализации цифровых фильтров;

уметь:

- программировать алгоритмы БПФ;
- выполнять анализ сигнала во временной и частотной области;
- анализировать разностные уравнения с постоянными коэффициентами с использованием z-преобразования;

владеть:

- методами описания дискретных сигналов во временной и частотной области;
- методами анализа дискретных последовательностей при помощи z-преобразования;
- методами проектирования и реализации цифровых фильтров.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается 6 семестре очной формы обучения. Всего на изучение дисциплины отводится 146 часов, из них аудиторных – 86 часов, по видам занятий: лекций – 42 часов, лабораторных занятий – 38 часов, УСП – 6 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет – 4 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Методы Фурье-анализа

Тема 1. 1. Классификация сигналов и методов Фурье-анализа. Дискретные и непрерывные сигналы. Периодические и аperiodические сигналы.

Тема 1. 2. Ряды Фурье. Ортогональность функций $\sin$ и $\cos$. Эффект Гиббса. Тригонометрическая запись ряда Фурье. Комплексная запись ряда Фурье.

Тема 1. 3. Интегральное преобразование Фурье. Дельта-функция. Преобразование Фурье дельта-функции (интерпретация). Прямоугольный импульс и его преобразование Фурье. Свойства преобразования Фурье. Свертка. Эффекты конечной длины выборки. Важность фазовой информации в сигнале.

Тема 1. 4. Дискретное временное преобразование Фурье. Вычисление импульсной характеристики идеального ФНЧ. Теорема о свертке. Вычисление ДВПФ при помощи таблиц. Поиск обратного ДВПФ при помощи табличным способом.

Тема 1. 5. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Алгебраический взгляд на ДПФ. Быстрое преобразование Фурье. Сложность ДПФ. Предварительные замечания. Алгоритм БПФ с прореживанием (децимацией) по времени. Свойства БПФ с основанием 2 и прореживанием по времени.

Раздел 2. Дискретизация непрерывного сигнала

Тема 2. 1. Дискретизация аналоговых сигналов по времени. Критерий Найквиста. Эффект подмены частот.

Тема 2. 2. Математическое описание процесса дискретизации. Фильтры для устранения эффекта наложения спектров.

Раздел 3. Z-преобразование

Тема 3. 1. Определение z-преобразования. Свойства z-преобразования. Сходимость z-преобразования.

Тема 3. 2. Анализ разностных уравнений с постоянными коэффициентами при помощи z-преобразования. Описание систем дискретного времени с помощью полюсов и нулей. Исследование устойчивости дискретных систем. Оценка импульсной характеристики.

Тема 3. 3. Обратное z-преобразование. Табличный метод. Метод разложения на элементарные дроби. Метод степенных рядов.

Раздел 4. Разработка фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров)

Тема 4. 1. Интуитивное представление о работе КИХ-фильтра. Ключевые особенности КИХ-фильтров.

Тема 4. 2. Линейная фазовая характеристика и её следствия. Типы КИХ-фильтров с фазовой характеристикой. Спецификация КИХ-фильтра.

Тема 4. 3. Методы расчета коэффициентов КИХ-фильтров. Метод взвешивания. Оптимизационные методы. Метод частотной выборки.

Тема 4. 4. Структуры КИХ-фильтров. Трансверсальная структура. Структура с линейной фазовой характеристикой. Критерии выбора структуры.

Раздел 5. Разработка фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтров)

Тема 5.1. Основные характеристики БИХ-фильтров. Этапы разработки цифровых БИХ-фильтров.

Тема 5.2. Методы расчета коэффициентов БИХ-фильтров. Расчет коэффициентов фильтра путем размещения нулей и полюсов. Методы согласованного z -преобразования. Метод билинейного z -преобразования.

Тема 5.3. Структуры БИХ-фильтров. Каскадная и параллельная реализация БИХ-фильтров. Влияние конечной разрядности на БИХ-фильтры.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

очная форма получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Методы Фурье-анализа	10			12		2	
1.1	Классификация сигналов и методов Фурье-анализа. Дискретные и непрерывные сигналы. Периодические и аperiodические сигналы.	2			2			Защита лабораторных работ
1.2	Ряды Фурье. Ортогональность функций $\sin$ и $\cos$. Эффект Гиббса. Тригонометрическая запись ряда Фурье. Комплексная запись ряда Фурье.	2						Экспресс-опрос
1.3	Интегральное преобразование Фурье. Дельта-функция. Преобразование Фурье дельта-функции (интерпретация). Прямоугольный импульс и его преобразование Фурье. Свойства преобразования Фурье. Свертка. Эффекты конечной длины выборки.	2			4			Защита лабораторных работ
1.4	Дискретное временное преобразование Фурье. Вычисление импульсной характеристики идеального ФНЧ. Теорема о свертке. Вычисление ДВПФ при помощи таблиц.	2					2	Контрольная работа
1.5	Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Алгебраический взгляд на ДПФ. Быстрое преобразование Фурье. Сложность ДПФ. Предварительные замечания. Алгоритм БПФ с прореживанием (децимацией) по времени. Свойства БПФ с основанием 2 и прореживанием по времени.	2			6			Защита лабораторных работ
2	Дискретизация непрерывного сигнала	4						
2.1	Дискретизация аналоговых сигналов по времени. Критерий Найквиста. Эффект подмены частот.	2						Устный опрос

2.2	Математическое описание процесса дискретизации. Фильтры для устранения эффекта наложения спектров.	2						Экспресс-опрос
3	Z-преобразование	8					4	
3.1	Определение z-преобразования. Свойства z-преобразования. Сходимость z-преобразования.	2						Устный опрос
3.2	Анализ разностных уравнений с постоянными коэффициентами при помощи z-преобразования. Описание систем дискретного времени с помощью полюсов и нулей. Исследование устойчивости дискретных систем. Оценка импульсной характеристики.	2					2	Контрольная работа
3.3	Обратное z-преобразование. Табличный метод. Метод разложения на элементарные дроби. Метод степенных рядов.	4					2	Контрольная работа
4	Разработка фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров)	10			18			
4.1	Интуитивное представление о работе КИХ-фильтра. Ключевые особенности КИХ-фильтров.	2			2			Защита лабораторных работ
4.2	Линейная фазовая характеристика и её следствия. Типы КИХ-фильтров с фазовой характеристикой. Спецификация КИХ-фильтра.	2			6			Защита лабораторных работ
4.3	Методы расчета коэффициентов КИХ-фильтров. Метод взвешивания. Оптимизационные методы. Метод частотной выборки.	4			6			Защита лабораторных работ
4.4	Структуры КИХ-фильтров. Трансверсальная структура. Структура с линейной фазовой характеристикой. Критерии выбора структуры.	2			4			Защита лабораторных работ
5	Разработка фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтров)	10			8			
5.1	Основные характеристики БИХ-фильтров. Этапы разработки цифровых БИХ-фильтров.	2			2			Защита лабораторных работ
5.2	Методы расчета коэффициентов БИХ-фильтров. Расчет коэффициентов фильтра путем размещения нулей и полюсов. Методы согласованного z-преобразования. Метод билинейного z-преобразования.	6			4			Защита лабораторных работ
5.3	Структуры БИХ-фильтров. Каскадная и параллельная реализация БИХ-фильтров. Влияние конечной разрядности на БИХ-фильтры.	2			2			Защита лабораторных работ
	ИТОГО	42			38		6	

ИНФОРМАЦИОННО - МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов в зеркале Matlab. СПб.: БХВ-Петербург, 2018.
2. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М. : Техносфера, 2012.
3. Малла С., Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – С. 671.

Перечень дополнительной литературы

1. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд ; пер. с англ. – М. : Мир, 1978.
2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов : практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис ; пер. с англ. - 2-е изд. - М. : Вильямс, 2004. - 992 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

С целью текущего контроля знаний студентов предусматривается проведение устных опросов, экспресс-опросов, лабораторных работ. По итогам обучения проводится зачет.

Итоговая оценка формируется на основе:

1. Правила проведения аттестации студентов (Постановление Министерства образования Республики Беларусь №53 от 29.05.2012г.).

2. Положения о рейтинговой системе оценки знаний по дисциплине в БГУ (Приказ ректора БГУ от 18.08.2015г. № 382-ОД).

3. Критериев оценки знаний студентов по 10 балльной системе оценки (письмо Министерства образования от 22.12.2003г.).

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- устный опрос – 25 %;
- экспресс-вопрос – 25 %;
- защита лабораторных работ – 50 %.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и зачетной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценки по текущей успеваемости составляет 30 %, зачетной оценки – 70 %.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Студент получает вопросы по теории и простейшие задачи к этим вопросам.

Раздел 1. Методы Фурье-анализа

Тема 1.4. Дискретное временное преобразование Фурье.

Вычисление дискретного во времени преобразования Фурье (ДВПФ). Вычисление интегрального преобразования Фурье. Вычисление коэффициентов разложения функции в ряд Фурье. Вычисление свертки (выходного сигнала линейной стационарной системы).

Форма контроля – контрольная работа.

Раздел 3. Z-преобразование

Тема 3.2. Анализ разностных уравнений с постоянными коэффициентами при помощи z-преобразования.

Вычисление z-преобразования. Определение области сходимости z-преобразования.

Форма контроля – контрольная работа.

Тема 3.3. Обратное z-преобразование.

Вычисление обратного z-преобразования табличным методом. Вычисление обратного z-преобразования методом разложения на элементарные дроби. Вычисление обратного z-преобразования разложения в степенной ряд.

Форма контроля – контрольная работа.

Образцы задач к заданиям.

Раздел 1. Методы Фурье-анализа

1. Найдите ДВПФ следующей последовательности:

$$x(n) = -\alpha^n u(-n-1), \quad |\alpha| > 1.$$

2. Дана линейная стационарная система с комплексной частотной характеристикой $H(e^{j\omega}) = e^{j\omega/4}$, $-\pi < \omega \leq \pi$. Определите отклик системы $y(n)$ на входной сигнал $x(n) = \cos(5\pi n/2)$.

3. Найдите ДВПФ следующей последовательности:

$$f(n) = 2^{-n} u(n),$$

где

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

4. Дан Фурье-образ вещественной последовательности ($|a| < 1$):

$$X(e^{j\omega}) = \frac{1}{1 - ae^{-j\omega}}.$$

Доказать, что $X_R(e^{j\omega}) = X_R(e^{-j\omega})$.

Раздел 3. Z-преобразование

1. Найти z-преобразование и область сходимости для $x(n) = u(n)$.
2. Найти z-преобразование и ОС для $x(n) = u(n)a^n e^{an}$.
3. Линейная стационарная (ЛС) система имеет следующую передаточную функцию

$$H(z) = \frac{z^2}{\left(z - 0.9 \cdot e^{\frac{j\pi}{2}}\right) \left(z - 0.9 \cdot e^{-\frac{j\pi}{2}}\right)}.$$

Найдите разностное уравнение, описывающее данную ЛС-систему;
Постройте импульсную характеристику ЛС-системы.

4. Найти последовательность $x(n)$, чье z-преобразование равно

$$X(z) = \ln(1 + az^{-1}), \quad |z| > a.$$

Примерная тематика лабораторных занятий

Основная цель проведения лабораторных занятий состоит в закреплении теоретического материала курса, приобретении навыков выполнения эксперимента, обработки экспериментальных данных, анализа результатов, грамотного оформления отчетов.

№ темы	Наименование лабораторной работы	Содержание
1	2	3
1.5	Быстрое преобразование Фурье	Программирование алгоритма быстрого преобразования Фурье.
1.1, 1.3	Преобразование Фурье: эффекты конечной длины	Изучение методов определения основных свойств случайных сигналов, таких, как мощность, спектральная плотность мощности и автокорреляционная функция,

	выборки.	получение практических навыков анализа случайных сигналов в среде Matlab.
4.1, 4.2, 4.3	Расчет цифровых КИХ-фильтров с линейной фазовой характеристикой методом взвешивания	Расчет импульсной характеристики КИХ фильтра с линейной фазовой характеристикой по заданной амплитудно-частотной характеристике.
4.2, 4.3	Расчет цифровых КИХ-фильтров методом частотной выборки	Расчет импульсной характеристики КИХ фильтра по заданной амплитудно-частотной характеристике методом частотной выборки.
4.3, 4.4	Расчет оптимальных КИХ-фильтров с минимаксной ошибкой	Расчет импульсной характеристики КИХ фильтра по заданной амплитудно-частотной характеристике используя алгоритм Ремеза.
5.1, 5.2, 5.3	Расчет цифровых фильтров с бесконечными импульсными характеристиками	Расчет типовых БИХ фильтров, используя функции проектирования Matlab

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется **эвристический подход**, который предполагает:

- осуществление студентами личностно-значимых открытий окружающего мира;
- демонстрацию многообразия решений большинства профессиональных задач и жизненных проблем;
- творческую самореализацию обучающихся в процессе создания образовательных продуктов;
- индивидуализацию обучения через возможность самостоятельно ставить цели, осуществлять рефлексию собственной образовательной деятельности.

При организации образовательного процесса используется также **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Для организации самостоятельной работы студентов по учебной дисциплине размещены на образовательном портале комплекс учебных и учебно-методических материалов: курсы лекций и методические указания к практическим занятиям, материалы текущего контроля и текущей аттестации, позволяющие определить соответствие учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации, в том числе вопросы для подготовки к экзамену, примерный перечень заданий для самостоятельного выполнения и самоконтроля, список рекомендуемой литературы).

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Классификация сигналов и методов Фурье-анализа. Дискретные и непрерывные сигналы. Периодические и аperiodические сигналы.
2. Ряды Фурье. Доказательство ортогональности функций $\sin$ и $\cos$.
3. Тригонометрическая запись ряда Фурье. Комплексная запись ряда Фурье.
4. Преобразование Фурье. Дельта-функция во временной и частотной областях.
5. Прямое и обратное преобразования Фурье (анализ и синтез).
6. Преобразование Фурье функций $\sin$ и $\cos$.
7. Прямоугольный импульс и его преобразование Фурье.
8. Свойства симметрии преобразования Фурье.
9. Теоремы о преобразовании Фурье.
10. Дискретное преобразование Фурье длины N . Свойство ортогональности дискретных комплексных экспонент.
11. Быстрое вычисление дискретного преобразования Фурье (БПФ).
12. Теорема о выборке (теорема В.А.Котельникова).
13. Критерий Найквиста. Эффект подмены частот.
14. Z-преобразование. Его связь с преобразованием Фурье. Понятие области сходимости.
15. Свойства z-преобразования.
16. Анализ разностных уравнений с постоянными коэффициентами при помощи z-преобразования.
17. Обратное z-преобразование: табличный метод.
18. Обратное z-преобразование: метод простейших дробей.
19. Обратное z-преобразование: метод разложения в степенной ряд.
20. Линейная и циклическая свертка.
21. Алгоритм вычисления линейной свертки с использованием ДПФ.
22. Типы цифровых фильтров (ЦФ). Передаточная (характеристическая) функция ЦФ.

23. Передаточная функция цифрового нерекурсивного фильтра с линейной фазовой характеристикой.
24. Использование оконных функций при синтезе КИХ-фильтров. Обобщенное окно Хэмминга.
25. Методы расчета коэффициентов КИХ-фильтров: Оптимизационные методы и метод частотной выборки.
26. Расчет коэффициентов БИХ-фильтра путем размещения нулей и полюсов.
27. Расчет коэффициентов БИХ-фильтра методом согласованного z -преобразования.
28. Расчет коэффициентов БИХ-фильтра методом билинейного z -преобразования.
29. Структуры БИХ-фильтров. Каскадная и параллельная реализация БИХ-фильтров. Влияние конечной разрядности на БИХ-фильтры.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____/____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета
