

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра управления в технических системах



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

Е.И. Луковникова Е.И. Луковникова

«29» мая 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Б1.В.09

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

27.03.04 Управление в технических системах

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Управление и информатика в технических системах

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 27.03.04 Управление в технических системах от 20.10.2015 г № 1171 и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» от 03.02.2020 г № 46 для очной формы обучения, заочно - ускоренной формы обучения для набора 2020 года

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	4
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	7
4.3 Лабораторные работы.....	35
4.4 Семинары / практические занятия.....	35
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	35
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	36
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	37
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	37
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	38
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	38
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ / семинаров / практических работ	38
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	47
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	47
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	49
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	53
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	54

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к проектно-конструкторскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенцией и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Изложение базовых принципов математического моделирования цифровых систем управления (ЦСУ) для обеспечения желаемых динамических свойств; основных свойств динамики дискретных объектов, принципов построения и функционирования основных элементов ЦСУ.

Задачи дисциплины

Подготовить обучающихся к самостоятельной работе по решению практических задач, связанных с расчётом и моделированием ЦСУ, которые специалист будет использовать в производственной деятельности, связанной с эксплуатацией, настройкой и разработкой технических систем.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ПК-6	способность производить расчёты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления	знать: - способы классификации ЦСУ; уметь: - производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления; владеть: - навыками выбора стандартных средств автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.9 «Цифровые системы управления» относится к вариативной части.

Дисциплина «Цифровые системы управления» базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как Б1.Б.10 Электротехника и электроника, Б1.Б.15 Теория автоматического управления.

Дисциплина «Цифровые системы управления» представляет основу для изучения дисциплин: Б1.Б.16 Технические средства автоматизации и управления, Б1.В.ДВ.06.01 Многомерные и многосвязные системы управления.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	3	6	144	54	18	18	18	94	-	экзамен
Заочная	5	-	144	15	5	5	5	129	-	экзамен
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	экзамен
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			6
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	54	11	54
Лекции (Лк)	18	5	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	3	18
Практические занятия (ПЗ)	18	3	18
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	54	-	54
Подготовка к лабораторным работам	20	-	20
Подготовка к практическим занятиям	20	-	20
Подготовка к экзамену в течении семестра	14	-	14
III. Промежуточная аттестация экзамен	36	-	36
Общая трудоемкость дисциплины час.	144	-	144
зач. ед.	4	-	4

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая само- стоятельную работу обучающихся и трудоёмкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоя- тельная ра- бота обуча- ющихся
			лекции	лабо- ратор- ные работы	прак- тиче- ские занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах	16	3	3	3	7
1.1.	Цели и задачи курса ЦСУ	1,5	0,5	-	-	1
1.2.	Квантование по времени и по уровню	3	0,5	0,75	0,75	1
1.3.	Типы импульсной модуляции	3	0,5	0,75	0,75	1
1.4.	Исследование динамики дискретных систем	1,25	0,25	-	-	1
1.5.	Амплитудно-импульсный элемент и его эквивалентное представление	3	0,5	0,75	0,75	1
1.6.	Формирующее звено и его математическое описание. Экстраполятор нулевого порядка	3	0,5	0,75	0,75	1
1.7.	Эквивалентная схема разомкнутой импульсной системы	1,25	0,25	-	-	1
2.	Цифровые методы обработки сигналов	15	2	3	3	7
2.1.	Постановка задачи	8	1	1,5	1,5	4
2.1.	Квантование сигналов по уровню	7	1	1,5	1,5	3
3.	Равномерное квантование	14	2	3	3	6
4.	Неравномерное квантование	8	2	-	-	6
5.	Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов	16	3	3	3	7
5.1.	Энергетический спектр шума квантования	4	1	-	-	3
5.2.	Кодирование квантованных сигналов	12	2	3	3	4
6.	Обобщённая структурная схема ЦСУ	9	2	-	-	7
7.	Типы синхронизации в ЦСУ	15	2	3	3	7
8.	Принципы регенерации цифровых сигналов	15	2	3	3	7
	ИТОГО	108	18	18	18	54

- для заочной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая само- стоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоя- тельная ра- бота обуча- ющихся
			лекции	лабо- ратор- ные работы	прак- тиче- ские занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах	19	1	1	1	16
1.1.	Цели и задачи курса ЦСУ	3,1	0,1	-	-	3
1.2.	Квантование по времени и по уровню	2,7	0,2	0,25	0,25	2
1.3.	Типы импульсной модуляции	3,7	0,2	0,25	0,25	3
1.4.	Исследование динамики дискретных систем	2,1	0,1	-	-	2
1.5.	Амплитудно-импульсный элемент и его эквивалентное представление	2,7	0,2	0,25	0,25	2
1.6.	Формирующее звено и его математическое описание. Экстраполятор нулевого порядка	2,6	0,1	0,25	0,25	2
1.7.	Эквивалентная схема разомкнутой импульсной системы	2,1	0,1	-	-	2
2.	Цифровые методы обработки сигналов	18,5	0,5	1	1	16
2.1.	Постановка задачи	10,25	0,25	0,5	0,5	9
2.1.	Квантование сигналов по уровню	8,25	0,25	0,5	0,5	7
3.	Равномерное квантование	15,5	0,5	0,5	0,5	14
4.	Неравномерное квантование	14,5	0,5	-	-	14
5.	Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов	19	1	1	1	16
5.1.	Энергетический спектр шума квантования	7,5	0,5	-	-	7
5.2.	Кодирование квантованных сигналов	11,5	0,5	1	1	9
6.	Обобщённая структурная схема ЦСУ	14,5	0,5	-	-	14
7.	Типы синхронизации в ЦСУ	18,5	0,5	1	1	16
8.	Принципы регенерации цифровых сигналов	15,5	0,5	0,5	0,5	14
	ИТОГО	135	5	5	5	120

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1:

Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах

1.1. Цели и задачи курса ЦСУ

Важнейшим классом дискретных систем являются цифровые САУ. Первые результаты использования цифровых вычислительных машин (ЦВМ) в системах автоматического управления показали, что они обладают большой гибкостью и универсальностью по сравнению с аналоговой техникой. Вследствие этого цифровые средства управления стали широко применяться в САУ. Их использование позволило решать качественно новые задачи управления, реализовывать сложные алгоритмы управления, связанные с обработкой большого количества информации, которую трудно провести с помощью аналоговой техники. Усложнение алгоритма управления, реализуемого на базе аналоговой техники, неизбежно требует увеличения числа резисторов, конденсаторов и других элементов. В то же время аналогичное усложнение алгоритма управления в рамках цифровых систем приводит лишь к усложнению программы для ЦВМ. Цифровые системы обладают высокой помехоустойчивостью, так как сигналы в таких системах являются кодированными и передаются практически без ошибок (за исключением ошибки, вносимой квантованием по уровню). Использование ЦВМ в контуре управления позволяет применить методы нелинейного программирования, оптимального управления, теории самонастраивающихся систем.

При учете квантования сигналов по уровню математическая модель цифровой САУ оказывается принципиально нелинейной и весьма сложной для исследования. Вследствие этого процесс проектирования таких систем обычно разделяется на два этапа. На первом этапе используется линейное приближение – линейная импульсная система. При этом не учитывается операция квантования по уровню и производится линеаризация непрерывной части системы, если в этом есть необходимость. На втором этапе исследования используется нелинейная математическая модель цифровой САУ. Она позволяет установить возможность возникновения незатухающих колебаний в системе, определить их параметры, область существования и т.д.

В данном курсе рассматривается динамика цифровых САУ на основе линейных математических моделей.

Дисциплина «Цифровые системы управления» (ЦСУ) является продолжением курса «ТАУ». Цель преподавания дисциплины «ЦСУ» – ознакомление обучающихся с типовыми моделями цифровых систем управления, основными свойствами динамики дискретных объектов (независимо от их физической природы), принципами построения и методами синтеза цифровых регуляторов и наблюдателей состояния.

Задачи дисциплины ЦСУ (необходимо изучить):

- общие сведения о дискретных автоматических системах;
- импульсный элемент (иэ) и его уравнения;
- уравнения и передаточные функции (ПФ) разомкнутых импульсных систем;
- вычисление Z-передаточных функций;
- уравнения и ПФ замкнутых импульсных систем;
- частотные характеристики (ЧХ) дискретных систем;
- частотные свойства импульсных систем;
- устойчивость импульсных систем;
- алгебраические критерии устойчивости импульсных систем.

1.2. Квантование по времени и по уровню

В непрерывных автоматических системах, изучавшихся в курсе «Основы ТАУ», сигналы, поступающие на входы и выходы элементов САУ, являются, как правило, непрерывными функциями времени. Однако во многих случаях оказывается выгодным переход от непрерывного к дискретному способу представления и преобразования информации. Этот переход осуществляется дискретизацией непрерывного сигнала, т.е. заменой непрерывной функции $f(t)$ дискретными значениями f_1, f_2, \dots, f_n . Дискретизация (квантование) непрерывного сигнала может осуществляться по времени, по уровню или и по времени и по уровню.

Дискретизация сигнала по времени состоит в замене непрерывного сигнала (рис. 1.1, а) дискретными значениями, взятыми в определенные, заранее заданные моменты времени. Обычно эти моменты времени равноудалены друг от друга на величину T , которая называется интервалом квантования или периодом дискретности (рис. 1.1, б). В этом случае последовательность $\{f_n\}$, $n=1,2,3,\dots$, определяется формулой $f_n = f(t = nT)$.

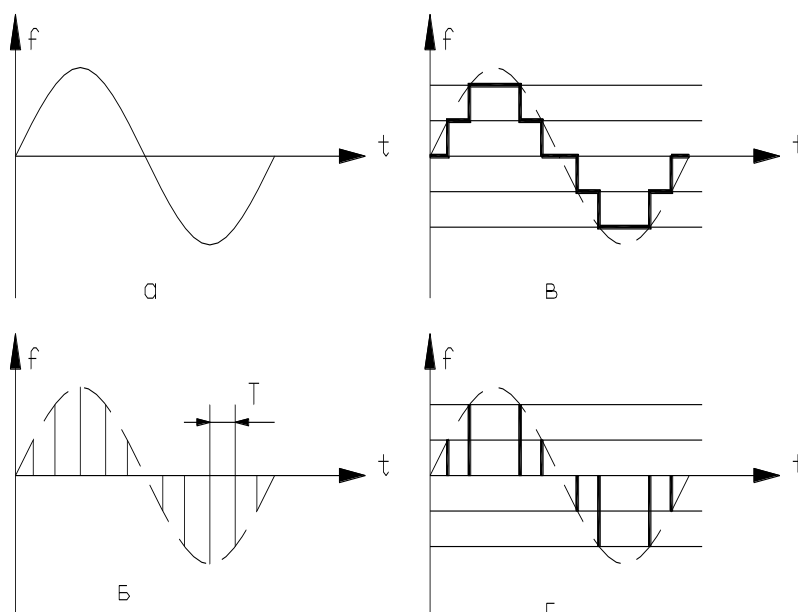
Дискретизация по уровню предполагает замену непрерывного сигнала числовой последовательностью $f_1, f_2, \dots, f_n, \dots$, элементы которой могут принимать лишь заранее определенные, обычно равноотстоящие друг от друга значения (рис. 1.1, в). Моменты времени, в которые происходит смена уровней, определяются видом непрерывного сигнала $f(t)$ и заранее неизвестны.

Дискретизация и по времени и по уровню совмещает в себе изложенные выше два способа формирования последовательности $\{f_n\}$, $n=1,2,\dots$. При этом непрерывный сигнал заменяется дискретной последовательностью $\{f_n\}$, $n=1,2,\dots$ взятой в заранее заданные моменты времени, и каждый элемент этой последовательности округляется до ближайшего к нему значения уровня из числа разрешенных (рис. 1.1, г).

Обычно применяют следующую классификацию дискретных систем:

- **Опр. 1** импульсные системы, в которых осуществляется дискретизация хотя бы одной из переменных системы по времени;
- **Опр. 2** релейные системы, в которых осуществляется дискретизация по уровню;
- **Опр. 3** цифровые системы, в которых осуществляется дискретизация сигналов и по времени и по уровню.

Из приведенных трех типов дискретных систем релейные САУ обычно рассматриваются



как непрерывные системы с разрывной нелинейностью. В данном курсе ограничимся изучением импульсных и цифровых систем, особенности динамики которых определяются дискретизацией по времени.

1.2. Виды импульсной модуляции

Рис. 0.1 – Дискретизация сигнала

При дискретизации по времени непрерывная функция заменяется своими *дискретами*, выделенными в определенные моменты времени. Однако на практике нельзя реализовать решетчатую функцию с бесконечно малым временем существования каждого выделенного значения. При конечном времени работы технических устройств получается последовательность импульсов определенной длительности, промодулированная выделенными дискретами непрерывной функции. В теории дискретных систем принято выделять ИЭ, осуществляющий дискретизацию по времени и модуляцию. В схемах ИЭ обозначают так, как показано на рис. 1.2.

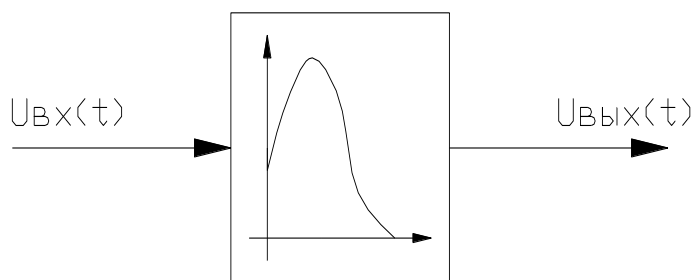


Рис. 1.2 – Изображение ИЭ

В случае АИМ амплитуда импульса постоянной длительности A_n определяется дискретной $f[nT]$

$$A_n = \varphi \left[\frac{nT}{T} \right] \quad (1.1)$$

В частном случае линейной АИМ

$$A_n = Kf \left[\frac{nT}{T} \right] \quad n = 0, 1, \dots \quad (1.2)$$

Этот случай иллюстрируется рис. 1.3, а.

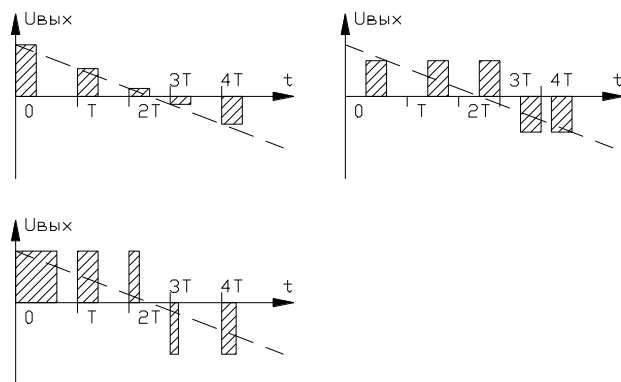


Рис. 1.3

Отметим, что два последних вида импульсной модуляции принципиально нелинейны. Дискретизацию и по времени и по уровню можно рассматривать как АИМ, когда в зависимости для A_n функция φ имеет вид, представленный на рис. 1.4. Таким образом, цифровые системы можно трактовать как один из типов линейных импульсных систем.

Таким образом, ИЭ порождает последовательность импульсов, параметры которых связаны со значениями непрерывного сигнала в моменты квантования $0, T, 2T, 3T$ (здесь и далее будем считать моменты квантования равностоящими друг от друга). В зависимости от того, какой параметр импульса определяется значениями выделенных дискрет, различают амплитудно-импульсную (АИМ), широтно-импульсную (ШИМ) и фазо-импульсную (ФИМ) модуляции.

При ШИМ (рис. 1.3, б) амплитуда импульсов постоянна, а их длительность (не превышающая интервала квантования) зависит от выделенных значений дискрет, т.е.

$$\gamma_n T = \varphi \left[\frac{nT}{T} \right], \quad n = 0, 1, \dots \quad (1.3)$$

При ФИМ амплитуда и ширина импульса постоянны, а величина $f[nT]$ определяет его положение внутри интервала квантования (рис. 1.3, в), т.е.

$$\beta_n T = \varphi \left[\frac{nT}{T} \right] \quad n = 0, 1, \dots \quad (1.4)$$

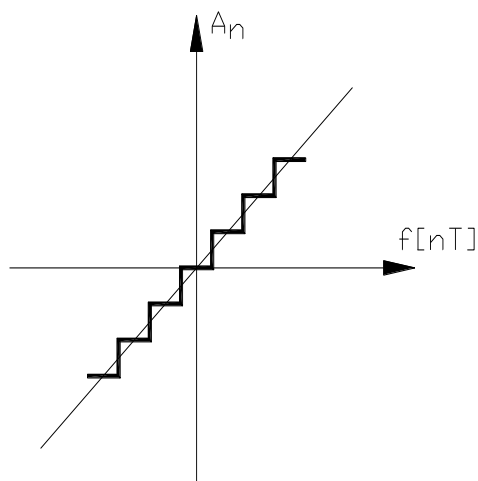


Рис. 1.4

Линейные импульсные системы характеризуются наличием в своем составе ИЭ, осуществляющего линейную АИМ.

1.4. Исследование динамики дискретных систем

Как и в непрерывных системах, исследование динамики дискретных систем может проводиться либо с использованием переменных состояния, либо с использованием входных и выходных переменных систем.

В первом случае исследование обычно проводят во временной области, рассматривая систему разностных уравнений и анализируя свойства её решений. Этот подход и разработанные в его рамках методы являются весьма плодотворными. Они позволяют рассматривать нелинейные многомерные дискретные системы, проводить исчерпывающее исследование их свойств, решать задачи синтеза в различной постановке.

Во втором случае исследуют не весь набор переменных состояния, а лишь поведение некоторых величин, по изменению которых и оценивается качество САУ - выходные переменные системы. В задачу исследования может входить анализ зависимости выходных переменных от входных величин, решение вопроса, как придать системе требуемые свойства по этим переменным и т.п. При этом для линейных импульсных систем наиболее простым и распространенным математическим аппаратом описания и исследования является аппарат дискретного преобразования Лапласа и Z-преобразования, позволяющий получить уравнение САУ в изображениях и найти дискретные передаточные функции (ДПФ).

1.5. Амплитудно-импульсный элемент и его эквивалентное представление

Простейшую импульсную систему можно представить в виде соединения ИЭ и непрерывной части. Рассмотрим амплитудно-импульсный элемент (АИЭ). Импульсный элемент представляет собой устройство, на выходе которого в момент времени $t = 0, T, \dots, nT, \dots$ наблюдается последовательность импульсов произвольной формы с амплитудами, пропорциональными дискретам входного сигнала $x[nT]$. Обозначение АИЭ в схемах и соответствующие при этом друг другу входной и выходной сигналы показаны на рис. 1.5.

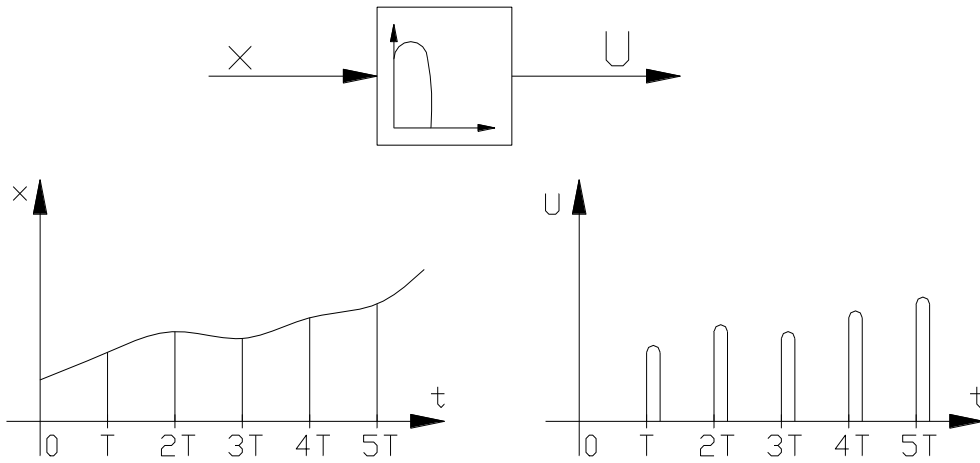


Рис. 1.5 – ИИЭ

дьями, равными дискретам входной величины $x[nT]$.

Пусть функция $s(t)$ задает форму импульса на выходе ИЭ, соответствующего единичной дискрете входного сигнала, приложенной в момент времени $t=0$, в силу свойства линейности дискрете $x[nT]$ соответствует импульс

$$U(t) = x[nT] \cdot s(t - nT). \quad (1.5)$$

(сдвиг аргумента t на nT объясняется тем, что импульс возникает при $t = nT$ и не раньше). Определим реакцию на дискрету $x[nT]$ последовательного соединения ИИЭ и непрерывного звена с импульсной переходной функцией $s(t)$ (см. рис. 1.6). При этом $x^*(t) = x[nT] \cdot \delta(t - nT)$.

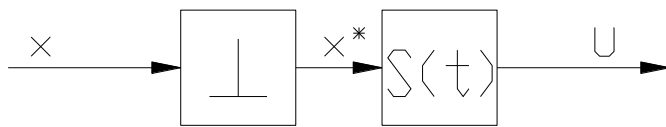


Рис. 1.6 – Последовательное соединение ИИЭ и непрерывного звена

Пройдя через непрерывное звено, дельта-функция в силу свойств импульсной переходной характеристики развернется в сигнал $s(t - nT)$ и, таким образом, на выходе цепочки получим функцию $U(t) = x[nT] \cdot s(t - nT)$, совпадающую с функцией (1.5). Отсюда следует, что импульсный элемент с произвольной формой импульса $s(t)$ можно представить как последовательное соединение ИИЭ и непрерывного звена с импульсной переходной функцией $s(t)$. Это непрерывное звено может быть также задано своей ПФ $S(p) = L[s(t)]$.

Опр. 5 Линейное звено, определяющее форму импульса, называют также формирующим звеном, или экстраполятором, и обычно присоединяют его к непрерывной части системы.

Таким образом, в линейной импульсной системе с одним ИЭ можно выделить идеальный ИЭ и непрерывную часть.

Рассмотрим ИИЭ. В соответствии с определением уравнение, связывающее входной $x(t)$ и выходной $x^*(t)$ сигналы ИИЭ, имеет вид

$$x^*(t) = x[nT] \cdot \delta(t - nT) + x[(n-1)T] \cdot \delta(t - (n-1)T) + \dots + x[0] \cdot \delta(t) + \dots = x(t) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT), \quad (1.6)$$

т.е. выходная переменная есть последовательность δ -функций, промоделированных входным сигналом. При этом

$$L[x^*(t)] = \int_0^{\infty} x(t) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT) \cdot e^{-pt} dt = \sum_{n=0}^{\infty} x[nT] \cdot e^{-pnT} = X^* \cdot \sum_{n=0}^{\infty} e^{-pnT} = X \cdot \sum_{n=0}^{\infty} e^{-pnT} = X \cdot \frac{1}{1 - e^{-pT}},$$

т.е. преобразование Лапласа выходной величины ИИЭ равно дискретному преобразованию Лапласа решетчатой функции $x[nT]$. Связь между изображениями непрерывной $x(t)$ и решетчатой $x[nT]$ функций устанавливается зависимостью

При математическом описании ИЭ оказывается удобным понятие идеального импульсного элемента (ИИЭ).

Опр. 4. Под ИИЭ будем понимать звено, выходная величина $x^*(t)$ которого представляет собой последовательность δ -функций с площадями, равными дискретам входной величины $x[nT]$.

$$X^* \Phi \cong \frac{x \Phi}{2} + \frac{1}{T} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_H \left(p + jm \frac{2 \cdot \pi}{T} \right). \quad (1.7)$$

В итоге ИИЭ может быть описан зависимостями (1.6) или (1.7). Зависимость (1.6) устанавливает связь между входной $x(t)$ и выходной $x^*(t)$ переменными, зависимость (1.6) - между соответствующими изображениями.

1.6. Формирующее звено и его математическое описание. Экстраполиатор нулевого порядка

Формирующее звено порождает из δ -импульсов на выходе ИИЭ последовательность физических импульсов, характерную для данного устройства. Как отмечалось ранее, импульсная переходная функция формирующего звена $s(t)$ (весовая функция) определяется формой импульса. ПФ формирующего звена $S(p)$ задается выражением

$$S \Phi \cong L \{ \mathbf{C} \}.$$

Например, если выходная последовательность импульсов имеет вид, представленный на рис. 1.7, то ПФ формирующего звена будет

$$S \Phi \cong k \cdot \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p}, \quad (1.8)$$

где k - коэффициент пропорциональности амплитуды выходного импульса и соответствующей дискреты входного сигнала.

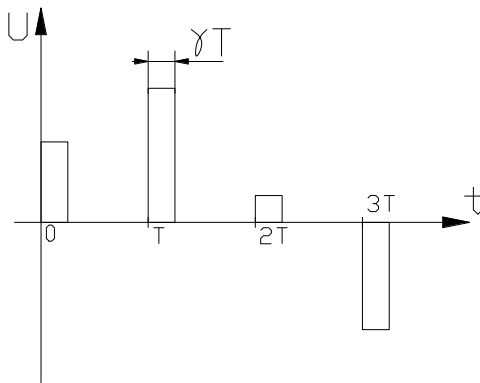


Рис. 1.8 – Выходная последовательность импульсов

другие формы выходных сигналов ИЭ, однако в САУ наиболее часто используются прямоугольные импульсы. Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением формирующих звеньев с ПФ (1.4) или (1.5).

Опр. 6 Если выходная величина ИЭ остается постоянной в течение всего интервала квантования T , то формирующее звено называется экстраполиатором нулевого порядка.

Его ПФ имеет вид

$$s(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}. \quad (1.9)$$

Здесь и далее будем считать, что $k=1$. В практике импульсного регулирования могут встречаться и

1.7. Эквивалентная схема разомкнутой импульсной системы

Рассмотрим простейшую разомкнутую импульсную систему, состоящую из АИЭ и непрерывной части. ИЭ может быть представлен в виде последовательного соединения ИИЭ и экстраполиатора. Таким образом, импульсная система всегда может быть приведена к соединению ИИЭ и непрерывных звеньев, как это показано на рис. 1.9.

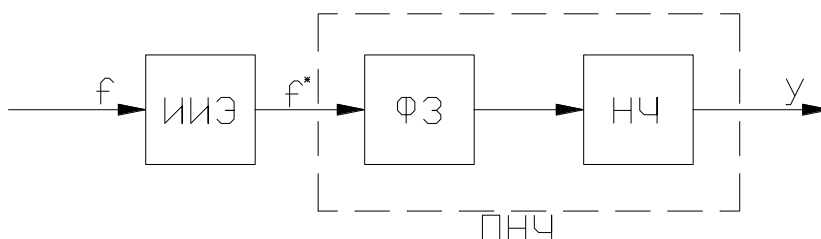


Рис. 1.9 – Импульсная система

При таком представлении используют понятие *приведенной непрерывной части* (ПНЧ), состоящей из собственно непрерывной части, последовательно соединенной с формирующим звеном ИЭ. ПФ ПНЧ определяется выражением

$$\widehat{W\Phi} = S\Phi \cdot W_{\text{ПЧ}}\Phi.$$

ПЧ также может исчерпывающим образом характеризоваться своей весовой функцией

$$w\Phi = L^{-1}V\Phi$$

Раздел 2:

Цифровые методы обработки сигналов

Лекция проводится в интерактивной форме с текущим контролем (2 час.)

2.1. Постановка задачи

Системы передачи с частотным и временным разделением каналов относятся к *аналоговым системам передачи* (АСП), так как при их построении используются аналоговые методы модуляции, когда параметры переносчика принимают в некоторой области их изменений практически неограниченное множество значений. Это затрудняет выделение сигналов на фоне помех, коррекцию различного вида искажений и ведет к их накоплению.

Избежать накопления помех и искажений возможно, если известно как можно больше параметров линейного сигнала. При этом достаточно только иметь информацию о наличии сигнала на фоне помех и искажений, чтобы его полностью восстановить по известным параметрам и тем самым исключить влияние помех и искажений и их накопление.

Такие возможности открывают цифровые методы передачи сообщений, позволяющие существенно снизить, а иногда и вообще избежать процесса накопления помех и искажений.

Сущность цифровых методов передачи состоит в том, что параметры переносчиков могут принимать конечное (счетное) множество значений, изменяющееся через известные *квантованные* значения. Примером такой обработки сигналов является переход от передачи непрерывных сигналов к передаче их дискретных (отсчетных) значений, отбираемых согласно теореме В. А. Котельникова, методами импульсной модуляции информационных параметров переносчиков, принимающих неограниченное множество состояний. Дискретными методами можно ограничить и эти множества. Например, при амплитудно-импульсной модуляции амплитуды отсчетов принимают любые значения в пределах от $A_{\text{мин}}$ до $A_{\text{макс}}$. Используя дискретизацию амплитудных значений отсчетов, можно заменить неограниченное множество амплитуд отсчетов конечным (счетным) множеством, образующих дискретный ряд амплитуд $\delta, 2\delta, \dots, M\delta$ в диапазоне от $A_{\text{мин}}$ до $A_{\text{макс}}$. Этот ряд квантованных отсчетов называется *разрешенными состояниями*.

Опр. 1. Замена непрерывного множества амплитуд отсчетов дискретным называется квантованием по уровню, а соответствующий сигнал - квантованным по уровню.

Опр. 2. Величина δ называется *шагом квантования*, число которых

$$M = \frac{A_{\text{макс}} - A_{\text{мин}}}{\delta}.$$

При ШИМ длительность импульсов принимает неограниченное множество состояний в пределах от $\tau_{\text{мин}}$ до $\tau_{\text{макс}}$. Применяя процесс квантования для ШИМ сигналов, можно вышеназванное множество заменить дискретным рядом длительностей отсчетов $\Delta\tau, 2\Delta\tau, \dots, M\Delta\tau$. Величина $\Delta\tau$ называется *шагом квантования по длительности*, а число шагов квантования (*разрешенных состояний*) при этом $M = \frac{\tau_{\text{макс}} - \tau_{\text{мин}}}{\Delta\tau}$. Аналогичную процедуру можно выполнить и для сигналов ФИМ.

Существенное достоинство дискретных методов передачи состоит в том, что они позволяют значительно уменьшить накопление помех вдоль линии путем восстановления (*регенерации*) сигнала. Возможность регенерации основана на том, что в дискретных системах передачи все разрешенные состояния *квантованного* сигнала в точности известны в пункте приема. Это позволяет сравнить принятый сигнал, подвергшийся воздействию помех и искажений, со всеми разрешенными в данной системе состояниями сигнала, выбрать из них наиболее близкий к принятому и направить его получателю. Наиболее просто процесс регенерации выполняется для *двоичных сигналов*, т.е. для сигналов с двумя разрешенными состояниями.

При связи на большие расстояния регенерацию можно повторить неоднократно, разделяя линию связи на отрезки и устанавливая в конце каждого из них восстанавливающее сигнал устройство, называемое *регенеративной трансляцией*.

В современных ЦСУ непрерывные первичные сигналы подвергаются дискретизации методами амплитудно-импульсной модуляции и затем квантуются по уровню. Квантованные отсчеты подвергаются кодированию, с помощью которого образуется цифровой сигнал, представляющий случайную последовательность токовых («единиц») и бестоковых («нулей») посылок.

2.2. Квантование сигналов по уровню

При квантовании по уровню непрерывный диапазон амплитуд отсчетов АИМ сигнала заменяется счетным множеством разрешенных уровней квантования U_i . При этом непрерывный динамический диапазон отсчетов АИМ сигнала разбивается на ряд отдельных участков, называемых *шагами квантования* δ_i . Если амплитуда отсчета сигнала $U_{\text{вх}}$ удовлетворяет условию

$$U_i - \frac{\delta_i}{2} \leq U_{\text{вх}} \leq U_i + \frac{\delta_i}{2} \quad (2.1)$$

то сигналу присваивается амплитуда, соответствующая i -му уровню квантования.

Таким образом, квантование представляет процесс сравнения отсчета АИМ сигнала со шкалой, имеющей конечное число уровней квантования, и отнесения его к ближайшему разрешенному уровню. Иными словами, процесс квантования представляет округлению амплитуды отсчета до ближайшего разрешенного уровня.

Последовательность отсчетов и соответствующие им квантованные отсчеты показаны на рис. 2.1.

Опр. 3. Устройство, осуществляющее квантование, называется *квантующим*.

Передаточная характеристика квантующего устройства является ступенчатой (см. рис. 2.1, а), поскольку каждый дискретный выходной уровень соответствует некоторому интервалу значений входного сигнала.

Опр. 4. Разность между сигналом АИМ-2 (см. рис. 2.1, б) и его квантованным приближением - квантованным АИМ сигналом (см. рис. 2.1, а) называется *ошибкой*, или *шумом квантования* ε , величина которого не превышает половины шага квантования δ_i , т.е.

$$\varepsilon \leq U_{\text{вх}} - U_i \leq \frac{\delta_i}{2}. \quad (2.2)$$

Из рис. 2.1, а очевидно, что чем больше разрешенных уровней квантования M , т.е. чем меньше шаг квантования, тем меньше величина ошибки, или шума квантования.

Амплитудная характеристика квантующего устройства $U_{\text{вых}} = \phi(U_{\text{вх}})$, как следует из рис. 2.1, а, представляет собой ступенчатую кривую, имеющую два характерных участка: *зону квантования*, при $-U_0 \leq U_{\text{вх}} \leq +U_0$, и *зону ограничения* при $U_{\text{вх}} > U_0$. Соответственно, различают *шумы квантования* и *шумы ограничения*.

Опр. 5. Если во всем диапазоне значений входного сигнала от $-U_0$ до $+U_0$ величина шага квантования δ_i остается величиной постоянной, то такое квантование называется *равномерным*; если же величина шага квантования изменяется с изменением значения $U_{\text{вх}}$ сигнала, то такое квантование называется *неравномерным*.

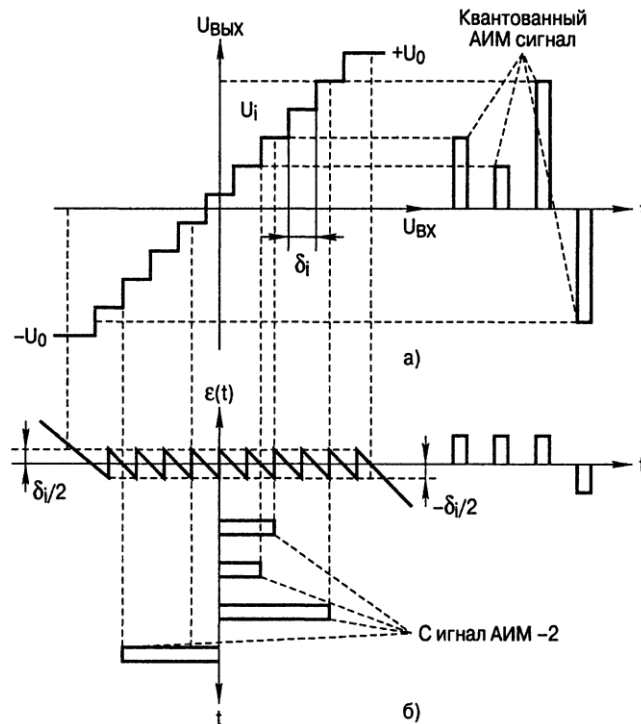


Рис. 2.1 – Процесс квантования. Шумы квантования

Раздел 3:

Равномерное квантование

Пусть плотность вероятности распределения мгновенных значений входного сигнала описывается функцией $w(u_{\text{вх}})$ и его квантование осуществляется в пределах от $-U_0$ до $+U_0$. Этот диапазон разбит на M шагов квантования, каждый из которых лежит в пределах от $u_i - \delta_i/2$ до $u_i + \delta_i/2$.

Вероятность появления сигнала с уровнем, лежащим в пределах i -го шага квантования, равна

$$p_i \left(u_i - \frac{\delta_i}{2} \leq u_{\text{вх}} \leq u_i + \frac{\delta_i}{2} \right) = \int_{u_i - \delta_i/2}^{u_i + \delta_i/2} w(u_{\text{вх}}) du_{\text{вх}}. \quad (3.1)$$

Поскольку шаг квантования мал по сравнению с диапазоном изменения входного сигнала, эта вероятность может быть принята равной

$$p_i \left(u_i - \frac{\delta_i}{2} \leq u_i \leq u_i + \frac{\delta_i}{2} \right) \approx w(u_i) \delta_i. \quad (3.2)$$

В последней формуле $w(u_i)$ - плотность вероятности величины напряжения сигнала в середине рассматриваемого интервала.

Мгновенная мощность шума квантования, развиваемая на единичном сопротивлении, равна квадрату ошибки квантования для данного шага квантования

$$W_{\text{мгн}i} = (u_{\text{вх}} - u_i)^2,$$

а мощность шума квантования, возникающего при квантовании сигналов, лежащих в пределах i -го шага квантования, соответствует

$$W_i = \int_{u_i - \delta_i/2}^{u_i + \delta_i/2} (u_{\text{вх}} - u_i)^2 \cdot w(u_{\text{вх}}) du_{\text{вх}} \approx \frac{1}{12} w(u_i) \delta_i^3. \quad (3.3)$$

С учетом выражений (3.1) и (3.3) имеем

$$W_i = \frac{1}{12} \delta_i^2 p_i. \quad (3.4)$$

Мощность полного шума квантования равна сумме составляющих от каждого шага

$$W_{\text{кв}} = \sum_{i=0}^M \frac{1}{12} \delta_i^2 p_i. \quad (3.5)$$

При равномерной шкале квантования $\delta_i = \delta$, $\sum_{i=1}^M p_i = 1$ и, следовательно,

$$W_{\text{кв}} = \frac{1}{12} \delta^2. \quad (3.6)$$

Из (3.6) очевидно, что при равномерной шкале квантования мощность шумов квантования не зависит от уровня квантуемого сигнала и определяется только шагом квантования.

Шумы квантования действуют только одновременно с передачей сигнала: есть сигнал - есть шумы квантования, нет сигнала - нет шумов квантования. Поэтому влияние шумов квантования на качество передачи удобно оценивать отношением сигнал-шум квантования (ОСШК), равным

$$\eta = W_c / W_{\text{кв}}, \quad (3.7)$$

или в логарифмических единицах (дБ) оно рассматривается как защищенность сигнала от шума квантования

$$A_{\text{кв}} = 10 \lg \left(\frac{W_c}{W_{\text{кв}}} \right), \quad (3.8)$$

здесь W_c - мощность полезного сигнала.

При известном динамическом диапазоне квантуемого сигнала шаг квантования δ определяет число уровней квантования M и, следовательно, число элементов (или разрядность) кода t , необходимого для последующего кодирования квантованных отсчетов сигнала с целью формирования *двоичного цифрового сигнала*.

Сигналы, поступающие на вход квантующего устройства от различных источников, могут значительно различаться по мощности, динамическому диапазону. Например, из-за различия микрофонов, вида и длины абонентских линий, особенностей говорящих параметры телефонных сигналов значительно разнятся между собой. Поскольку параметры квантующего устройства и в последующем устройства кодирования остаются неизменными, то шаг квантования следует выбирать исходя из того, чтобы шумы квантования не превышали допустимого значения для минимальных по мощности сигналов. В то же время во избежание значительных шумов ограничения порог ограничения U_0 (рис. 2.1, а) должен выбираться исходя из параметров максимального по уровню. Порог ограничения выбран в k раз больше, чем среднеквадратическое значение напряжения ($\sigma_{\text{макс}}$) максимального по уровню входного сигнала, т.е.

$$U_0 = k \sigma_{\text{макс}}. \quad (3.9)$$

Если шкала квантования строится таким образом, чтобы шумы ограничения не возникали, то величина U_0 должна совпадать с пиковым значением сигнала. В этом случае коэффициент k показывает, во сколько раз пиковое значение сигнала больше его среднеквадратического значения, и численно совпадает с *пик-фактором* сигнала. В общем случае коэффициент k устанавливает связь между значениями параметров сигнала и шкалы квантования. С его использованием между U_0 , δ и числом уровней квантования M может быть установлена следующая связь:

при квантовании двуполярных сигналов:

$$M = 2|U_0|/\delta + 1 \approx 2|U_0|/\delta; \quad (3.10)$$

при квантовании однополярных сигналов:

$$M = |U_0|/\delta. \quad (3.11)$$

Подставив выражения (3.10), (3.11) в формулу (3.7), получим иное представление для оценки шума квантования. В случае двуполярного сигнала имеем:

$$W_{кв} = \frac{1}{3} \frac{U_0^2}{M^2} = \frac{1}{3} \frac{k^2 \sigma_{смакс}^2}{M^2}$$

В случае однополярного сигнала получим:

$$W_{кв} = \frac{1}{12} \frac{U_0^2}{M^2} = \frac{1}{12} \frac{k^2 \sigma_{смакс}^2}{M^2}. \quad (3.12)$$

Мощность полезного сигнала равна его дисперсии, т.е.

$$W_c = \sigma_c^2, \quad (3.13)$$

поэтому и квадрат среднеквадратического значения $\sigma_{смакс}^2$ представляет мощность наибольшего входного сигнала, т.е. $W_{смакс} = \sigma_{смакс}^2$.

Используя (3.8), (3.9) и (3.13), находим ОСШК:

для двуполярных сигналов:

$$\eta = \frac{W_c}{W_{кв}} = \frac{3M^2}{k^2} \frac{\sigma_c^2}{\sigma_{смакс}^2} \quad (3.14)$$

или защищенность (в дБ):

$$A_{кв} = 10 \lg \frac{W_c}{W_{кв}} = 20 \lg \frac{M}{k} + 10 \lg 3 + 20 \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_{смакс}} \quad (3.15)$$

для однополярных сигналов:

$$\eta = \frac{W_c}{W_{кв}} = \frac{12M^2}{k^2} \frac{\sigma_c^2}{\sigma_{смакс}^2} \quad (3.16)$$

или

$$A_{кв} = 10 \lg \frac{W_c}{W_{кв}} = 20 \lg \frac{M}{k} + 10 \lg 12 + 20 \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_{смакс}}. \quad (3.17)$$

При m -разрядном кодировании $M = 2^m$. Подставив это значение в формулы (3.15) и (3.17), получим значения защищенности от шумов квантования для двуполярного сигнала:

$$A_{кв} = 6m - 20 \lg k + 20 \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_{смакс}} + 4,8 \quad (3.18)$$

и для однополярного сигнала:

$$A_{кв} = 6m - 20 \lg k + 20 \lg \frac{\sigma_c}{\sigma_{смакс}} + 10,8. \quad (3.19)$$

При квантовании сигнала от одного источника, когда $\sigma_c = \sigma_{смакс}$, защищенность от шумов квантования определится по формулам:

$$A_{кв} = 6m - 20 \lg 4,8 \quad (3.20)$$

для двуполярных сигналов и для однополярных сигналов

$$A_{кв} = 6m - 20 \lg 10,8. \quad (3.21)$$

Последние формулы показывают, что при равномерном квантовании защищенность $A_{кв}$ увеличивается на 6 дБ с возрастанием разрядов в кодовой группе на каждую единицу и при $\sigma_c < U_0$ она растет прямо пропорционально уровню сигнала [см. формулы (3.20) и (3.21)]. Так, при переходе от восьмиразрядного к девятиразрядному коду защищенность от шумов квантования $A_{кв}$ увеличивается на 6 дБ, но при этом требуемая скорость передачи возрастает на 12,5 %, что не всегда является приемлемым.

Гармонический сигнал. Величину порога ограничения U_0 примем равной амплитуде сигнала $U_{макс}$. Тогда коэффициент $k = U_{макс} / \sigma_c = \sqrt{2}$, а защищенность от шумов квантования согласно (3.21), будет равна

$$A_{кв1} = 6m - 20 \lg \sqrt{2} + 4,8 = 6m + 1,8. \quad (3.22)$$

Выражения (3.21) и (3.22) показывают, что защищенность от шумов квантования постоянна для сигналов различного уровня. Она минимально для слабых сигналов и растет с увеличением отношения $\sigma_c / \sigma_{смакс}$. При $\sigma_c = \sigma_{смакс}$ защищенность от шумов квантования

максимальна. При $\sigma_c > \sigma_{\text{макс}}$ возрастает вероятность появления шумов ограничения и защищенность от суммарного влияния шумов квантования и ограничения уменьшается. Рассчитаем мощность шума ограничения, предполагая, что квантованию подвергается гармонический сигнал.

Мгновенное значение шума ограничения $\xi_{\text{огр}} = u - U_0$ и его мощность связаны соотношением

$$W_{\text{огр}} = 2 \int_{U_{\text{огр}}}^{\infty} (u - U_{\text{огр}})^2 \cdot w(u) du. \quad (3.23)$$

Здесь $w(u) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_c} \exp\left[-\sqrt{2} \frac{|u|}{\sigma_c}\right]$ – плотность вероятности распределения мгновенных значений гармонического сигнала.

Подставив формулу для $w(u)$ в (3.23) и выполнив некоторые преобразования, получим

$$W_{\text{огр}} = \sigma_c^2 \exp\left(-k\sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{макс}}}{\sigma_c}\right). \quad (3.24)$$

Защищенность от шумов ограничения будет равна

$$A_{\text{огр}} = 10 \lg \frac{W_c}{W_{\text{огр}}} = 6k \frac{\sigma_{\text{макс}}}{\sigma_c}. \quad (3.25)$$

Отношение $W_c/W_{\text{огр}}$ растет с увеличением k , что естественно, поскольку при этом растет порог ограничения U_0 и, следовательно, уменьшается вероятность его превышения. Поскольку шумы квантования и ограничения независимы, то общий шум, возникающий при квантовании, равен сумме этих шумов, т.е.

$$W_{\Sigma} = W_{\text{кв}} + W_{\text{огр}} = \frac{k^2 \sigma_{\text{макс}}^2}{3M^2} + \sigma_c^2 \exp\left(-k\sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{макс}}}{\sigma_c}\right). \quad (3.26)$$

Результирующее значение отношения сигнал/шум определится, следовательно, по формуле

$$\eta_{\Sigma} = \frac{W_c}{W_{\Sigma}} = \frac{\sigma_c^2}{\frac{k^2 \sigma_{\text{макс}}^2}{3M^2} + \sigma_c^2 \exp\left(-k\sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{макс}}}{\sigma_c}\right)}. \quad (3.27)$$

На рис. 3.1 приведена зависимость этого отношения от значения относительного уровня входного сигнала, под которым понимается логарифмическая мера передачи вида $p_c = 20 \lg \left(\frac{W_c}{\sigma_{\text{макс}}}\right)$, для различных значений коэффициента k .

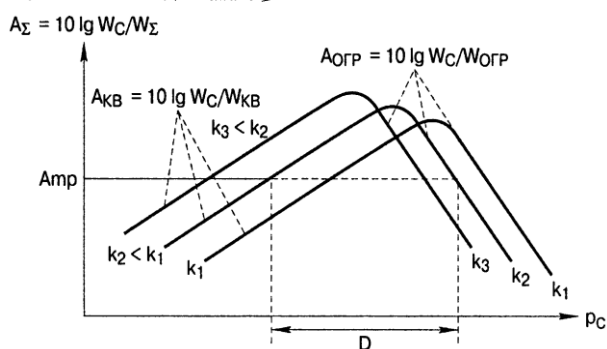


Рис. 3.1 – Защищенность от шумов квантования и ограничения в зависимости от относительного уровня входного сигнала

Изменение уровня входного сигнала, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, приводит к снижению защищенности.

По полученным характеристикам можно определить диапазон (условно динамический) уровней входных сигналов D при известном коэффициенте k , в пределах которого защищенность окажется не ниже требуемых значений $-A_{\text{мп}}$. Значение D легко может быть определено графически, как показано на рис. 3.1.

При построении зависимости имелось в виду, что при $\sigma_c < \sigma_{\text{макс}}$ преобладают шумы квантования, а при $\sigma_c > \sigma_{\text{макс}}$ преобладают шумы ограничения. Полученные графики имеют явно выраженные максимумы отношения сигнал/шум, положение которых несколько смещено от точки, где $\sigma_c = \sigma_{\text{макс}}$.

Из рассмотрения графиков (см. рис. 3.1) следует, что при равномерном квантовании существует оптимальный уровень входного сигнала, при квантовании которого отношение сигнал-шум оказывается наибольшим. Отклонение уровня входного сигнала, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, приводит к снижению защищенности.

С другой стороны, задавшись минимально допустимым значением защищенности и диапазоном изменений уровней входных сигналов, можно определить необходимую разрядность (или длину) кодовой комбинации при кодировании отсчета АИМ на выходе квантующего устройства при равномерном квантовании. Рассмотрим этот вопрос для случая кодирования сигналов, поступающих от различных источников. Пусть требуется обеспечить защищенность от шумов квантования не менее $A_{кв} = 25$ дБ для всех абонентов. Из (3.18) следует, что для самых слабых сигналов заданная защищенность будет обеспечена при $m = (42,2 + 25)/6 \approx 12$ (округляется в сторону большего целого), что соответствует числу уровней квантования $M = 2^{12} = 4096$. При этом защищенность для сигналов с максимальной амплитудой (сильных сигналов) будет более чем на 30 дБ превышать требуемую защищенность. Большое число разрядов кода при равномерном квантовании приводит к усложнению аппаратуры и увеличению требуемой пропускной способности трактов, что экономически невыгодно. Устранить указанный существенный недостаток можно, осуществляя неравномерное квантование.

Раздел 4: Неравномерное квантование

При неравномерном квантовании шаг квантования не остается постоянным, а является переменным и изменяется по определенному закону. Если потребовать постоянства защищенности от шумов квантования в заданном динамическом диапазоне для всех уровней входных сигналов, то можно легко определить, воспользовавшись формулами (3.6) и (3.8), зависимость шага квантования от мгновенного значения напряжения $u_{вх}$ (или тока) квантуемого сигнала:

$$\delta_i = u_{вхi} \sqrt{12} \cdot 10^{-0,05 \cdot A_{кв}}. \quad (4.1)$$

Из формулы (4.1) следует, что для слабых сигналов шаг квантования должен быть минимальным и возрастет с увеличением напряжения (тока) сигнала, т.е. должна быть нелинейная шкала квантования. Амплитудная характеристика соответствующего квантующего устройства при неравномерном квантовании показана на рис. 4.1.

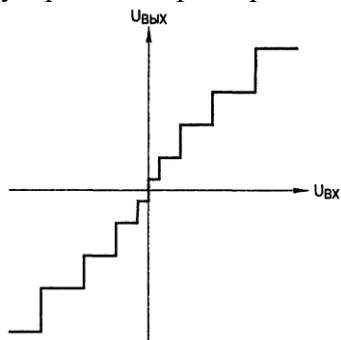


Рис. 4.1 — Неравномерная шкала квантования

Получение переменного шага квантования может быть реализовано следующими способами:

- сжатием динамического диапазона сигнала с помощью компрессора (K) перед кодированием его в кодирующем устройстве с линейной шкалой квантования и последующим его расширением экспандером (\mathcal{E}) после декодирования (рис. 4.1); **Опр. 1.** совокупность операций, проводимых компрессором и экспандером, называется компандированием сигнала; характеристика компандирования ($K - \mathcal{E}$), т.е. каскадного соединения компрессора и экспандера, должна быть линейной;
- нелинейным кодированием и декодированием;
- цифровым компандированием.

Указанные способы практически равноценны, но для теоретических исследований, последующих выводов и дальнейшей реализации различных методов неравномерного квантования, рассмотрим неравномерное квантование с помощью компандирования сигнала.

Для зависимости, изображенной на рис. 4.1, где по осям отложены нормированные значения входных $x = U_{вх} / U_{вхmax}$ и выходных $y = U_{вых} / U_{выхmax}$ сигналов, добиваются того, чтобы при изменении Δx приращение Δy было бы постоянным, а приращение Δx - обратно пропорционально наклону характеристики, т.е.

$$\Delta x = \frac{\Delta y}{dy/dx}. \quad (4.2)$$

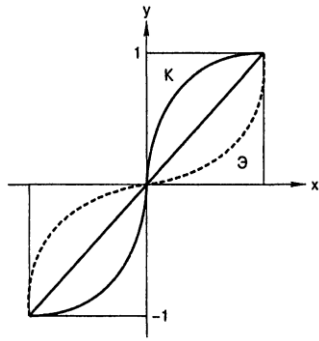


Рис. 4.2 – Реализация неравномерной шкалы квантования с помощью компандерных устройств

Соответственно шаг квантования по оси x будет равен

$$\delta_i = \frac{\delta}{dy/dx}. \quad (4.3)$$

Если число уровней квантования M в нормированном (от 1 до минус 1) диапазоне, то

$$\delta_i = \frac{2}{M} \cdot \left(\frac{dx}{dy} \right). \quad (4.4)$$

Среднюю мощность шума, обусловленного неравномерным квантованием, можно определить по выражениям (3.3)...(3.6), если вместо шага квантования δ_i , подставить его значение в каждом шаге квантования. Подставив выражение (4.4) в формулу (3.5), получим

$$W_{кв} = \sum_{i=1}^M \frac{1}{12} \cdot \delta_i^2 \cdot p_i = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^M \left(\frac{2}{M} \left(\frac{dx}{dy} \right) \right)^2; \quad p_i = \frac{1}{3M^2} \sum_{i=1}^M p_i \left(\frac{dx}{dy} \right)^2. \quad (4.5)$$

Для расчета мощности шумов квантования при большом числе уровней квантования M операцию суммирования можно заменить интегрированием, тогда

$$W_{кв} = \frac{1}{3M^2} \int w(x) \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 dx, \quad (4.6)$$

здесь $w(x)$ - плотность распределения вероятности нормированного сигнала на входе квантующего устройства. Мощность сигнала можно выразить через его плотность распределения вероятности $w(x)$ нормированного сигнала на выходе квантующего устройства

$$W_c = \int w(x) x^2 dx.$$

Тогда ОСШК с учетом (4.6) будет иметь вид

$$\frac{W_c}{W_{кв}} = \frac{3N^2 \int w(x) x^2 dx}{\int w(x) \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 dx}. \quad (4.7)$$

Для обеспечения постоянства ОСШК необходимо, чтобы

$$x/\Delta x = const = C_1. \quad (4.8)$$

Подставив в формулу (4.8) выражение (4.2), получим

$$x = C_1 \Delta x = C_1 \Delta y \left(\frac{dx}{dy} \right).$$

Так как Δy постоянно, то получим

$$dy = C_2 \left(\frac{dx}{x} \right).$$

Проинтегрировав правую и левую части последнего выражения, получим

$$y = C_2 \ln x + \ln \mu,$$

где $\ln \mu$ - постоянная интегрирования.

Отсюда

$$y = C_2 \ln \mu x. \quad (4.9)$$

Для нахождения постоянных этого выражения необходимо учитывать граничные условия закона изменений $y = \phi(x)$: 1) при $x = 0, y = 0$ и 2) при $x = 1, y = 1$.

Первое условие приводит к нереализуемому результату. Зависимость полученной функции не переходит через начало координат (рис. 4.3). Чтобы обеспечить реализацию, следует несколько изменить выражение (4.9) или изменить начальные условия.

При изменении выражения (4.9) под знак логарифма вводим постоянную C_3 :

$$y = C_2 \ln (\mu x + C_3). \quad (4.10)$$

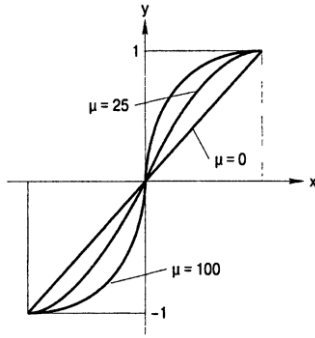


Рис. 4.3. – Характеристики μ -закона компандирования

ристикой типа μ (или μ -закон компандирования).

Опр. 3. Параметр μ называется коэффициентом сжатия и определяется из соотношения

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = 1 + \mu. \quad (4.12)$$

Здесь δ_{\max} и δ_{\min} - максимальное и минимальное значение шага квантования соответственно. Чем больше коэффициент сжатия μ , тем больше разница между δ_{\max} и δ_{\min} . Вид характеристики μ -закона компандирования для различных значений коэффициента сжатия μ показан на рис. 4.3. Выбор коэффициента сжатия зависит от характеристик входных сигналов. В существующих цифровых системах передачи принимают $\mu = 255$.

Для больших значений коэффициента сжатия μ защищенность от шумов квантования дупольярных сигналов может быть определена по формуле:

$$A_{\text{кв}} = 6m + 4,77 - 20 \lg \left[\ln \left(\frac{1 + \mu}{2} \right) \right]. \quad (4.13)$$

Из последнего выражения следует, что выбор коэффициента сжатия оказывает большое влияние на защищенность от шумов квантования.

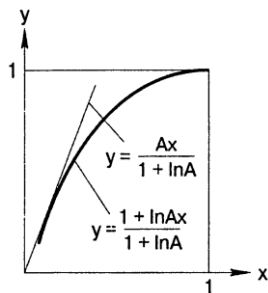


Рис. 4.4. – Логарифмический А-закон компандирования

Если $\mu = 255$, то для $m = 7$ имеем $A_{\text{кв}} = 32$ дБ, а при $m = 8$ соответственно $A_{\text{кв}} = 38$ дБ.

Вернемся к выражению (4.9). При изменении начальных условий реализацию обеспечивают таким образом. Будем считать, что равенство (4.9) действительно только на участках от $y = 1$ до точки x_1 (см. рис. 4.4), в которой касательная к функции $y(x)$ проходит через начало координат (штриховая линия), то на основании (4.9) и второго граничного условия получим:

$$C_2 = 1/\ln \mu$$

и, следовательно,

$$y = \frac{\ln \mu x}{\ln \mu}.$$

Если теперь принять $\mu = eA$, где e - основание натуральных логарифмов, то

$$y = \frac{\ln eAx}{\ln eA} = \frac{\ln e + \ln Ax}{\ln e + \ln A} = \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A}.$$

Так как эта функция действует только до определенной точки характеристики x_1 , после которой логарифмическая характеристика переходит в касательную прямую, проходящую через начало координат, то

$$Bx_1 = \frac{1 + \ln Ax_1}{1 + \ln A}. \quad (4.14)$$

В это точке равны производные обеих функций, т.е.

$$B = \frac{A/Ax}{1 + \ln A} = \frac{1/x}{1 + \ln A}, \text{ или } Bx_1 = \frac{1}{1 + \ln A}. \quad (4.15)$$

Приравняем выражения (4.14) и (4.15):

$$1 + \ln Ax_1 = 1, \text{ что возможно, если } x_1 = \frac{1}{A}. \text{ Отсюда } B = A / \left(\frac{1}{A} + \ln A \right). \text{ Тогда}$$

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + \ln A}, & \text{при } 0 \leq x \leq 1/A \\ \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A} & \text{при } 1/A \leq x \leq 1 \end{cases}. \quad (4.16)$$

Опр. 4. Закон компандирования, описываемый выражениями (4.16), называется A -законом. Параметр A , называемый *параметром сжатия (компрессии)*, обычно выбирается равным 87,6. Этот закон компандирования нашел широкое применение в европейских странах, в том числе и в России. Входные сигналы, напряжение которых меньше U_{\max}/A , подвергаются линейному кодированию, а сигналы, напряжение которых больше U_{\max}/A , подвергаются неравномерному квантованию по логарифмическому закону.

Нелинейное квантование позволяет значительно улучшить защищенность $A_{\text{кв}}$ в области малых сигналов за счет её некоторого снижения для сигналов с большим уровнем. Выигрыш от компандирования ΔA прямо пропорционален крутизне характеристики компрессии (сжатия) и для слабых сигналов может быть определен отношением шага квантования равномерного квантования к шагу квантования неравномерного квантования при $U_{\text{вх}} \rightarrow 0$. Мощность шумов квантования при равномерном квантовании рассчитывается по формуле (3.6). При неравномерном квантовании для слабых сигналов она будет определяться наименьшим шагом квантования

$$W_{\text{кв}} = \delta_{\text{мин}}/12.$$

Тогда выигрыш в защищенности за счет неравномерного квантования

$$\Delta A = 10 \lg \frac{12W_c}{\delta_{\text{мин}}^2} - 10 \lg \frac{12W_c}{\delta^2} = 20 \lg \frac{\delta}{\delta_{\text{мин}}}, \quad (4.17)$$

здесь W_c - мощность полезного сигнала.

Шаг квантования зависит от крутизны характеристики компрессора (см. рис. 4.2) и согласно выражению (4.3), отношение $\delta/\delta_{\text{мин}}$ равно dy/dx . При компандировании по A -закону для сигналов меньших или равных значениям $1/A$ (выражение 4.17) производная $dy/dx = A/(1 + \ln A)$ и для $A = 87,6$ выигрыш в защищенности от шумов квантования будет равен $\Delta A = 24$ дБ.

Для сравнения на рис. 4.5 приведены зависимости $A_{\text{кв}}$ защищенности от входного уровня сигнала $p_{\text{вх}}$ при равномерном (линейном), линия 1, и неравномерном (нелинейном) квантовании, линия 2.

Таким образом, неравномерное квантование для A закона компандирования позволяет, увеличив защищенность на 24 дБ, уменьшить на $24/6 = 4$ число разрядов кода, обеспечив требуемую защищенность от шумов квантования для наиболее слабых речевых сигналов при восьмиразрядном кодировании вместо двенадцатиразрядного при равномерном (линейном) квантовании.

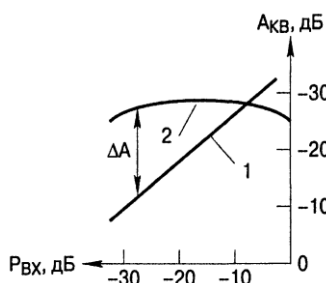


Рис. 4.5. – К определению выигрыша в защищенности при неравномерном квантовании

В современных ЦСУ используют цифровые компандерные устройства (компрессоры и экспандеры - сжиматели и расширители), которые объединены и взаимодействуют вместе с кодирующими и декодирующими устройствами. При этом в качестве функции $y(x)$ применяют характеристику гипотетического компрессора, которая представляет собой аппроксимацию одного из законов компандирования (μ или A) ломаной линией.

Раздел 5:

Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов

Лекция проводится в интерактивной форме с разбором конкретных ситуаций (3 час.)

5.1 Энергетический спектр шума квантования

Шум квантования, образующийся в результате дискретизации и квантования, представляет собой последовательность некоррелированных импульсов со случайной амплитудой (см. рис. 2.1, б). Энергетический спектр такой последовательности описывается выражением

$$G_{кв}(\omega) = \frac{2\tau_u^2}{T_\delta} \sigma_{кв}^2 \frac{\sin^2(\omega\tau_u/2)}{(\omega\tau_u/2)^2}, \quad (5.1)$$

где τ_u - длительность импульса; T_δ - период дискретизации; $\sigma_{кв}$ - дисперсия шума квантования. Форма энергетического спектра шума квантования показана на рис. 5.1.

Из (5.1) следует, что по мере уменьшения длительности импульсов отсчетов τ_u энергетический спектр шума квантования становится все более равномерным и при $\tau_u \rightarrow 0$ шум квантования превращается в «белый шум», имеющий постоянный энергетический спектр в широкой полосе частот, значительно превышающей ширину спектра сигнала.

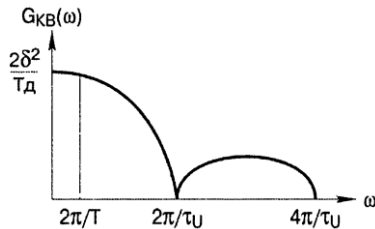


Рис. 5.1 - Энергетический спектр шумов квантования

Демодуляция АИМ сигнала осуществляется ФНЧ, частота среза которого равна верхней частоте спектра сигнала $F_{МАКС}$. Поскольку квантованный АИМ сигнал на входе демодулятора можно рассматривать как сумму исходного АИМ сигнала и шума квантования, для оценки ОСШК на выходе демодулятора рассмотрим прохождение через ФНЧ неискаженного сигнала и шума.

Мощность низкочастотной составляющей спектра АИМ сигнала в T_δ/τ_u раз меньше мощности исходного сигнала (для $m_a=1$), а максимальная частота этого спектра не может превышать половины частоты дискретизации. Мощность шума квантования на выходе демодулятора АИМ сигнала в полосе частот от нуля до половины частоты дискретизации $\Omega_\delta/2$ будет равна

$$W_{кввых} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\Omega_\delta/2} G_{кв}(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\Omega_\delta/2} \frac{2\tau_u^2}{T_\delta^2} \sigma_{кв}^2 \frac{\sin^2(\omega\tau_u/2)}{(\omega\tau_u/2)^2} d\omega.$$

На верхней частоте $\Omega_\delta/2$ аргумент $\omega\tau_u/2 = \frac{\pi\tau_u}{2T_\delta}$.

При $\tau_u \ll T_\delta$ имеем $\frac{\sin(\pi\tau_u/T_\delta)}{\pi\tau_u/T_\delta} \approx 1$.

Тогда выражение для мощности шумов квантования принимает вид

$$W_{кввых} = \sigma_{кв}^2 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2\tau_u^2}{T_\delta^2} \cdot \frac{\Omega_\delta}{2} = \sigma_{кв}^2 \frac{\tau_u^2}{T_\delta^2}. \quad (5.2)$$

Отсюда ОСШК на выходе ФНЧ демодулятора равно

$$\frac{W_{свых}}{W_{кв.вых}} = W_c \frac{\tau_u^2}{T_\delta^2} / \left(\sigma_{кв}^2 \frac{\tau_u^2}{T_\delta^2} \right) = \frac{W_c}{W_{кв}}.$$

Следовательно, при использовании в демодуляторе АИМ квантованного сигнала ФНЧ с полосой пропускания, равной половине частоты дискретизации, ОСШК на выходе фильтра равно отношению полных мощностей сигнала и шума квантования. Поэтому при расчетах можно считать, что спектр шума квантования сосредоточен в области частот $0 \dots \Omega_\delta/2$ и имеет в пределах этого диапазона равномерную спектральную плотность

$$G_{кв} \approx \frac{\sigma_{кв}^2}{\Omega_{\delta}/2} \cdot 2\pi = \frac{4\pi}{\Omega_{\delta}} \cdot \sigma_{кв}^2. \quad (5.3)$$

Если сигнал занимает полосу частот меньшую, чем Ω_{δ} , то целесообразно граничную частоту ФНЧ демодулятора принять равной верхней частоте сигнала $\Omega_{макс}$, поскольку такой фильтр подавит часть шума квантования, лежащую в частотном диапазоне от $\Omega_{макс}$ до $\Omega_{\delta}/2$, а сигнал пропустит полностью.

При неравномерном квантовании можно также считать, что спектр шума квантования является равномерным в полосе частот от 0 до $\Omega_{\delta}/2$.

Знание спектра шумов квантования особенно важно, когда подлежащий кодированию сигнал является групповым сигналом многоканальной системы управления с частотным разделением каналов. В этом случае шум на выходе канала обуславливается не только квантованием сигнала именно этого канала, но и квантованием группового сигнала; этот процесс создает широкополосный шум, часть которого попадает в каналный фильтр системы управления с частотным разделением каналов. Если все каналы предназначаются для использования в одинаковом режиме, то их средние сигналы следует считать также одинаковыми и, следовательно, спектр шума является равномерным.

4.2 Кодирование квантованных сигналов

Квантованный сигнал, в принципе, можно считать кодовым с основанием кода, равным числу M разрешенных уровней (уровней квантования), и с числом символов в кодовой группе, равным единице. Таким образом, квантованный сигнал является многоуровневым.

Многоуровневые сигналы весьма неудобны для передачи, так как приемник должен различать все разрешенные уровни. Кроме того, такие сигналы трудно восстановить (регенерировать), если они подверглись действию помех. Иными словами, многоуровневым сигналам в большей степени свойственны недостатки аналоговых сигналов. Поэтому в цифровых системах передачи обычно используются коды со сравнительно низким основанием, чаще всего двоичные.

Опр. 1. Процесс преобразования многоуровневого сигнала в код с низким основанием называется кодированием.

Результатом кодирования является комбинация символов (посылок, цифр), представляющая в соответствующей системе счисления номер разрешенного уровня квантованного сигнала. В ЦСУ широкое применение нашла двоичная система счисления. Запись любого квантованного уровня с M разрешенными уровнями в двоичной системе счисления может быть представлена в виде

$$M = \sum_{i=1}^m a_{m-i} \cdot 2^{m-i}, \quad (5.4)$$

здесь m - число разрядов кода; a_j - разрядная цифра, принимающая значения 0 или 1. С помощью m -разрядного двоичного кода можно закодировать число уровней квантования, равного

$$M = 2^m. \quad (5.5)$$

Поскольку выбор числа уровней квантования определяется допустимой величиной шага квантования, обычно приходится решать обратную задачу: определение минимально необходимого числа разрядов кода, который может быть использован для кодирования при заданном M . Из (5.5) очевидно, что для двоичного кода имеем

$$m = \text{ent}(\log_2 M), \quad (5.6)$$

здесь $\text{ent}(x)$ - означает, что берется целая часть числа x .

Например, для кодирования числа 111 необходимое число разрядов будет равно $m = \text{ent}(\log_2 111) = \text{ent}(6,79) = 7$, а запись числа 111 в соответствии с (5.6) будет иметь вид

$$111 = \sum_{i=1}^7 a_{7-i} \cdot 2^{7-i} = 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0,$$

т.е. ему соответствует кодовая комбинация 1101111, что соответствует значениям разрядных цифр равных $a_6 = 1$, $a_5 = 1$, $a_4 = 0$, $a_3 = a_2 = a_1 = a_0 = 1$. Набор величин $Q_{m-1} = 2^{m-i}$ можно рассматривать как ряд эталонных сигналов, имеющих вес, определенный номером разряда. Для нашего примера $Q_6 = 64$, $Q_5 = 32$, $Q_4 = 16$, $Q_3 = 8$, $Q_2 = 4$, $Q_1 = 2$, $Q_0 = 1$.

Однозначная связь величины эталонного сигнала с номером разряда двоичного эквивалента разрешенного квантованного уровня позволяет ограничиться передачей в системе управления только ряда величин a_i , составляющих кодовую комбинацию (или кодовую группу).

Опр. 2. Множество используемых кодовых комбинаций, связанных единым законом построения, называется кодом.

Простейшим кодом является код, в основе построения комбинаций которого лежит отношение (5.4), называется *натуральным двоичным кодом*. Графически коды удобно изображать кодовыми таблицами, или *кодowymi растрами*, характеризующими форму взаимной связи уровней квантования и соответствующих им кодовых комбинаций, представляя их по порядку уровней. На рис. 5.2, а показан кодовый растр пятиразрядного натурального двоичного кода, с помощью которого можно образовать 32 двоичных числа - кодовые комбинации и, следовательно, передать 32 квантованных уровня; 1 («единицы» или «импульсы») и 0 («нули» или «пробелы») показаны здесь соответственно черными и белыми квадратиками. Нумерация уровней дана сверху вниз, вверху указан вес разрядов кода.

Перестановка порядка следования кодовых комбинаций на обратный дает простой обратный код. Например, уровень $M = 22$ в натуральном коде представляется комбинацией вида 10110 (см. рис. 5.2, а), обратный код выразится комбинацией вида 01101. Замена всех импульсов в кодовой комбинации на пробелы (или «единиц» на «нули») приводит к инверсному коду. Так, для $M = 22$ в натуральном коде кодовая комбинация в инверсном коде будет иметь вид 01001.

Другой тип кода, применяемый в цифровых системах передачи, - *код Грея* (он же рефлексный или зеркальный). Его отличительной особенностью является то, что любые две соседние кодовые группы (см. рис. 5.2, б) отличаются друг от друга лишь в одном разряде. Это свойство используется при построении кодов и позволяет уменьшить ошибки кодирования. К коду Грея применимы понятия обратный или инверсный.

Еще один класс составляют симметричные коды. Для кодирования отсчетов, которые принимают более или менее одинаковые абсолютные значения выше и ниже своего нулевого уровня, может оказаться удобным использовать первый разряд для обозначения знака полярности, т.е. положительного или отрицательного, а остальные разряды для обозначения абсолютной величины. Если не принимать во внимание первый (высший) разряд, определяющий полярность квантованного АИМ сигнала, то получающаяся кодовая таблица (кодовый растр) оказывается симметричной относительно своей середины. Ясно (см. рис. 5.2, б), что код Грея также обладает свойством симметрии.

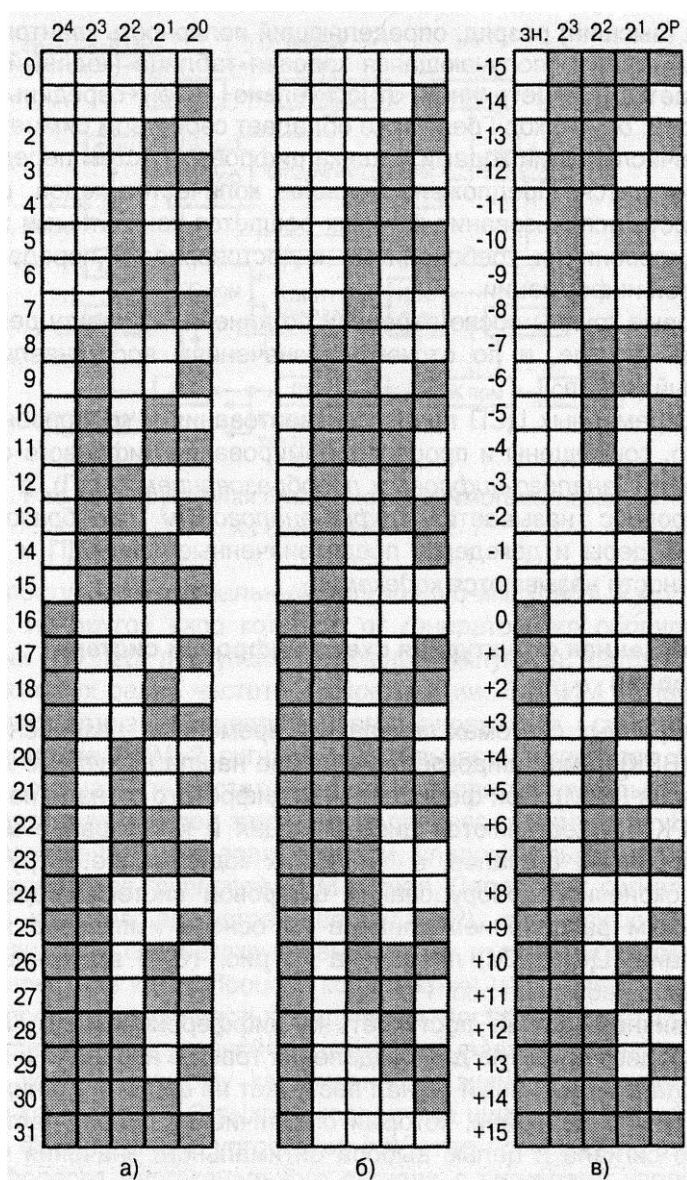


Рис. 5.2 – Кодовые таблицы двоичных кодов: а - натуральный двоичный код; б - рефлексный двоичный код Грея; в - симметричный двоичный код

Перечисленными кодами техника ЦСУ не ограничивается. Предложено большое количество кодов, целесообразность использования которых решается конкретными задачами кодирования и требованиями к достоверности передаваемой цифровой информации. В современных ЦСУ процессы квантования и кодирования, как правило, совмещены и процесс формирования цифрового сигнала называется *аналого-цифровым преобразованием* (АЦП), а обратный процесс называется *цифро-аналоговым преобразованием* (ЦАП).

Опр. 3. Кодеры и декодеры, предназначенные для АЦП и ЦАП, в совокупности называются *кодеками*.

Раздел 6: Обобщенная структурная схема ЦСУ

В ЦСУ с временным разделением каналов (ВРК) самое широкое применение нашла импульсно-кодовая модуляция (ИКМ). При формировании цифрового сигнала на основе ИКМ-ВРК осуществляются дискретизация и квантование аналоговых первичных сигналов, а затем их кодирование. Структурная схема окончательного оборудования ЦСУ с ВРК на основе ИКМ (ЦСУ-ИКМ) приведена на рис. 6.1, а временные диаграммы ее работы на рис. 6.2.

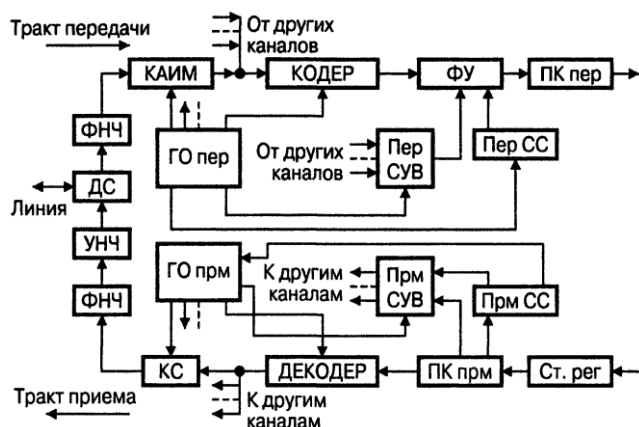


Рис. 6.1 – Структурная схема цифровой системы управления на основе ИКМ-ВРК

Первичный сигнал поступает на дифференциальную систему (ДС), предназначенную для разделения трактов передачи и приема. С выхода ДС первичный сигнал поступает на ФНЧ тракта передачи, который ограничивает полосу частот первичного сигнала с целью выбора оптимального значения частоты дискретизации F_d . Такое ограничение необходимо для того, чтобы при принятой частоте дискретизации обеспечить возможность восстановления сигнала без искажений с помощью реального ФНЧ тракта приема. С выхода ФНЧ тракта передачи ограниченный по спектру сигнал поступает на каналный амплитудно-импульсный модулятор (КАИМ), на другой вход которого от генераторного оборудования передачи (ГО пер) поступают каналные импульсы, частота следования которых равна частоте дискретизации. В КАИМ осуществляется дискретизация непрерывного первичного сигнала, т.е. формирование АИМ-2 сигнала. Длительность импульсов сигнала АИМ-2 должна быть достаточно большой для того, чтобы за время их существования успел закончиться процесс кодирования. Выходы КАИМ всех каналов запараллелены и, следовательно, на их выходах формируется групповой АИМ сигнал. Далее этот сигнал поступает в кодирующее устройство (КОДЕР), где осуществляется квантование по соответствующему закону и затем кодирование в выбранном типе кода. Процесс кодирования управляется периодической последовательностью импульсов, поступающих от ГО пер и следующих с определенной частотой, называемой тактовой f_T . На выходе кодера каждому квантованному значению соответствует кодовая комбинация. С выхода кодера уже цифровой сигнал поступает на формирующее устройство (ФУ), где происходит объединений цифрового многоканального сигнала с сигналами управления и взаимодействия систем автоматического регулирования, поступающих от передатчика сигналов управления и вызова (Пер СУВ) и сигналов синхронизации. Таким образом, на выходе ФУ получается цикл передачи, состоящий из N канальных интервалов (КИ), включая несколько дополнительных КИ, необходимых для передачи сигналов СУВ, синхросигнала, обеспечивающих синхронную работу КАИМ на передаче и канальных селекторов на приеме, и других вспомогательных сигналов. Каждый канальный интервал представляет собой m -разрядную кодовую комбинацию, в разрядах $P_m, P_{m-1} \dots P_1$ которой передаются двоичные символы (1 или 0).

Для обеспечения необходимого числа каналов передачи СУВ циклы ЦСУ на основе ИКМ-ВРК объединяются в сверхциклы. В зависимости от общего числа КИ в цикле и числа разрядов в кодовой комбинации тактовая частота, т.е. частота следования импульсов ИКМ-сигнала на выходе ФУ, будет равна

$$f_T = F_d \cdot m \cdot N. \quad (6.1)$$

Сигнал на выходе ФУ представляет собой однополярные двоичные символы. При передаче по линии такой сигнал будет претерпевать значительные искажения. Для уменьшения искажений необходимо осуществить перекодирование сигнала для согласования спектральных характеристик сигнала с частотными характеристиками направляющей среды - линии. Эту операцию выполняет преобразователь кода передачи (ПК пер), на выходе которого получаем *линейный цифровой сигнал* - ЛЦС.

ЛЦС при прохождении по линии испытывает различного вида искажения, подвергается воздействию помех, испытывает затухание. Для устранения всех этих влияний в тракте приема оконечной станции стоит стационарный регенератор (Ст. рег), восстанавливающий пришедший с линии цифровой сигнал по амплитуде, форме и временному положению. В преобразователе кода приема (ПК прм) этот восстановленный сигнал преобразуется в импульсы двоичного кода, аналогичные импульсам на выходе ФУ тракта передачи. В этом же устройстве осуществляется выделение тактовой частоты, управляющей работой генераторного оборудования приема (ГО прм). Декодер преобразует групповой ИКМ-сигнал в групповой

АИМ-сигнал. Временные каналные селекторы (КС) распределяют этот сигнал по отдельным каналам. Импульсные последовательности от ГОпрм поочередно открывают КС каждого канала, обеспечивая выделение отсчетов своего канала из группового АИМ-сигнала. С выхода КС каналный АИМ-сигнал поступает на вход ФНЧ, который из спектра АИМ сигнала выделяет полосу частот исходного первичного сигнала. Мощность первичного сигнала на выходе ФНЧ незначительна и для доведения ее до номинального значения используется усилитель низкой частоты.

Образование группового сигнала в ЦСУ на основе ИКМ-ВРК приведено на рис. 6.2.

На рис. 6.2, а-в представлены первичные сигналы $C_1(t)$ - первого, $C_2(t)$ - второго и $C_N(t)$ - N -го каналов и их дискретные сигналы, взятые через интервал времени T_d (период дискретизации); на рис. 6.2, г представлен групповой АИМ сигнал $C_{АИМ}(t)$ и на рис. 6.2, д представлен цифровой ИКМ сигнал $C_{ИКМ}$.

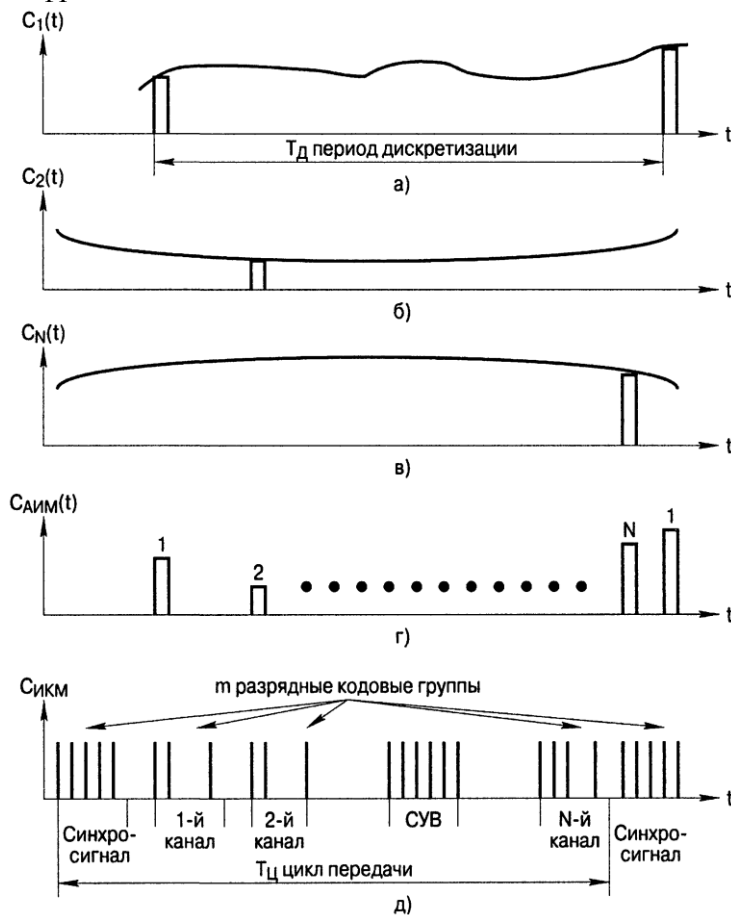


Рис. 6.2 – Образование группового ИКМ сигнала

Определить необходимую полосу частот для передачи группового ИКМ сигнала можно следующим образом.

Из рис. 6.2, д следует

$$T_u = m \cdot \tau_{II} \cdot N \quad \text{или} \\ 1/\tau_{II} = \underbrace{m \cdot N}_{T_u} = F_d \cdot m \cdot N, \quad (6.2)$$

здесь τ_{II} - длительность импульса кодовой комбинации, N - общее число КИ в цикле передачи. Для передачи одиночного импульса длительностью τ_{II} вполне достаточно полосы частот $\Delta f_{ИКМ} = 1/\tau_{II}$ и, с учетом (6.2), получим

$$\Delta f_{ИКМ} = F_d \cdot m \cdot N.$$

Полоса частот группового ИКМ сигнала соответствует скорости передачи соответствующего ему цифрового потока, т.е.

$$C_{ИКМ} = F_d \cdot m \cdot N.$$

Скорость передачи цифрового потока одного канала

$$C_k = F_d \cdot m.$$

Раздел 7:

Виды синхронизации в ЦСУ

Для систем передачи с ИКМ-ВРК необходимо обеспечить синхронную и синфазную работу канальных амплитудно-импульсных модуляторов и канальных селекторов, кодирующих и декодирующих устройств.

Синхронность реализуется системой тактовой синхронизации, а синфазность - системой цикловой синхронизации.

Синхронизация по тактовой частоте обеспечивает равенство скоростей обработки сигналов на передаче и приеме и выполняется выделением колебаний тактовой частоты из спектра ЛЦС выделителем тактовой частоты (ВТЧ).

Тактовой частотой в системе передачи ИКМ-ВРК является частота следования импульсов группового цифрового сигнала на выходе ФУ (см. рис. 6.1). В простейшем случае сигнал на выходе ФУ представляет однополярную случайную последовательность импульсов со

скважностью, равной двум. Энергетический спектр такой последовательности $G(\omega)$ при одинаковых вероятностях появления «единиц» и «нулей», а также при отсутствии флуктуации длительности и моментов появления импульсов, содержит постоянную составляющую G_0 , дискретную $G_D(\omega)$ и непрерывную $G_H(\omega)$ составляющие (рис. 7.1).

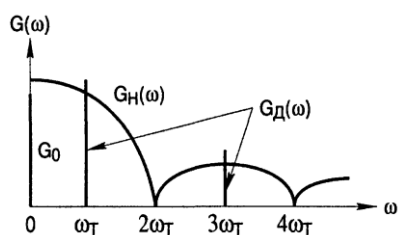


Рис. 7.1 – Энергетический спектр ИКМ сигнала

Дискретная составляющая представляет собой сумму гармоник тактовой частоты. Составляющая с тактовой частотой может быть выделена из группового ИКМ сигнала узкополосным фильтром, настроенным на эту частоту. В полосу пропускания фильтра в данном случае попадает также часть непрерывного спектра $G_H(\omega)$, которая играет роль помехи и приводит к флуктуациям тактовой частоты. Очевидно, что флуктуации тем меньше, чем меньше полоса пропускания.

Цикловая синхронизация определяет начало цикла передачи. Поскольку структура цикла всегда известна, цикловая синхронизация позволяет осуществить разделение каналов. Действие систем цикловой синхронизации основано на использовании избыточности группового ИКМ сигнала, которая специально вводится в групповой сигнал. С этой целью, как показано на рис. 6.2, д, кроме кодовых групп канальных сигналов в состав цикла вводятся дополнительные кодовые группы или отдельные символы цикловой синхронизации, образующие *синхросигнал*.

В системах управления с ИКМ-ВРК основное применение нашли устройства цикловой синхронизации с использованием синхросигнала. Очевидно, что какая бы группа символов ни была выбрана в качестве синхросигнала, всегда существует определенная вероятность появления такого же сочетания информационных символов в групповом ИКМ сигнале. Если, например, синхросигнал представляет семиразрядную кодовую комбинацию, то при равной вероятности появления в цифровом сигнале символов «1» и «0» вероятность появления ложной синхрогруппы $p_L = (0,5)^7 = 0,0078125$. Эта вероятность довольно велика. Поэтому структура синхросигнала является недостаточным признаком, и для осуществления надежной цикловой синхронизации необходимо дополнительно использовать еще одно важное свойство синхросигнала, а именно его *периодичность*. Периодичность истинного синхросигнала определяется тем, что он появляется всегда *на одних и тех же позициях в пределах цикла передачи*, а ложные синхрогруппы занимают случайное положение. Контролируя периодичность появления синхрогрупп, можно определить, являются ли они истинными или ложными. Вероятность ошибки при этом оказывается тем меньше, чем большее число циклов используется в процессе принятия решения.

Частота следования циклов всегда кратна тактовой частоте. Поэтому генераторное оборудование может автономно выработать сигнал цикловой синхронизации путем деления тактовой частоты на число, равное числу передаваемых в пределах цикла кодовых групп. Например, в системе типа ИКМ-30, где цикл состоит из 30 кодовых групп каналов, одной кодовой группы, предназначенной для передачи сигналов СУВ, и одной синхрогруппы, частота следования циклов может быть получена делением тактовой частоты на 32. Однако фаза синхроимпульсов, вырабатываемых автономно генераторным оборудованием, может быть произвольной, и задача системы цикловой синхронизации состоит в том, чтобы осуществить их фазирование с сигналами цикловой синхронизации, приходящих с линии.

Совокупность устройств, формирующих кодовую комбинацию синхросигнала, обеспечивающих ее ввод в групповой ИКМ сигнал на передаче и выделение ее из группового ИКМ сигнала на приеме, образуют *систему цикловой синхронизации* (ЦС).

Система ЦС содержит передатчик и приемник синхросигнала, (рис. 7.2), где приняты следующие обозначения:

ГОпер и ГОпр - генераторное оборудование передающей и приемной станций соответственно; ФУ - формирующее устройство (см. рис. 6.1); ВТЧ - выделитель тактовой частоты, необходимый для обеспечения тактовой синхронизации; СС - синхросигнал; РУ - решающее устройство.

Система цикловой синхронизации работает следующим образом. Передатчик с помощью регистра сдвига и логического устройства преобразует периодическую последователь-

ность импульсов, поступающих от ГОпер в кодовую комбинацию, соответствующую сигналу цикловой синхронизации, далее синхросигнал (СС) поступает на ФУ тракта передачи оконечной станции и вводится в групповой ИКМ сигнал. На приемной станции входной сигнал поступает на опознаватель СС приемника синхросигнала, предназначенный для определения кодовой комбинации, соответствующей СС. Опознаватель представляет регистр сдвига, к выходам которого непосредственно или через инверторы подключена схема совпадения. Если структура входной комбинации совпадает с СС, то на выходе опознавателя появляется импульс. Этот импульс подается на один из входов анализатора; на другой его вход подается сигнал, вырабатываемый ГОпр. Если система находится в состоянии циклового синхронизма, то сигналы на входах анализатора совпадают во времени. При отсутствии синхронизма сигналы от опознавателя и ГОпр во времени не совпадают. Выход анализатора подключен к решающему устройству (РУ). Если в течение определенного числа циклов $r_{вх}$ анализатор регистрирует совпадение во времени сигналов на его входах, то РУ принимает решение о наличии в системе синхронизма и никаких изменений в работе ГОпр не производит. Величина $r_{вх}$ называется *коэффициентом накопления по входу в синхронизм* и обычно он равен 3...4. При несовпадении импульсов на входах анализатора на вход РУ подается сигнал об отсутствии синхронизма. Если в течение определенного числа циклов $r_{вых}$, называемого *коэффициентом накопления по выходу из синхронизма* и обычно равным 4...6, синхронизм отсутствует, то РУ отмечает отсутствие синхронизма и формирует сигнал ошибки, вызывающий задержку (торможение) импульсов цикловой синхронизации, вырабатываемых ГОпр, на один период тактовой частоты. Цикл оказывается увеличенным на время T_T - период тактовой частоты, а расстояние между импульсами от ГОпр и синхрогруппой на один такт уменьшается. Если и при этом они не совпадут, то РУ вновь вырабатывает сигнал ошибки, импульс от ГОпр сдвигается еще на один такт и т. д. Этот процесс будет повторяться до тех пор, пока импульсы цикловой синхронизации и импульсы ГОпр не совпадут, после чего анализатор определит наличие синхронизма. Отметим, что РУ принимает решение о наличии или отсутствии синхронизма не на основании единичного испытания, а только при нескольких последовательных повторениях какого-либо события. Так обеспечивается необходимая защита от ложных синхрогрупп и действия помех.

При появлении в пределах одного цикла ложной синхрогруппы РУ не примет решения о необходимости «торможения» импульсов цикловой синхронизации, а вероятность появления ложных синхрогрупп на одних тех же позициях в течение $r_{вх}$ циклов пренебрежимо мала. С другой стороны, одиночные искажения синхрогрупп помехами не могут вывести систему из состояния синхронизма, вероятность поражения помехами $r_{вых}$ синхрогрупп подряд также крайне мала.

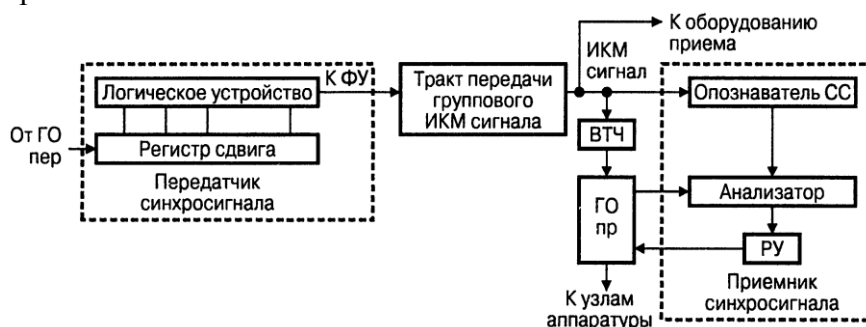


Рис. 7.2 – Структурная схема системы цикловой синхронизации

Сигнал *тактовой синхронизации* формируется в выделителе тактовой частоты (ВТЧ).

К системам цикловой синхронизации предъявляются следующие основные требования:

- время вхождения в синхронизм при первоначальном включении аппаратуры в работу и время восстановления синхронизма после нарушения связи должно быть минимальным;
- состояние синхронизма при работе оборудования ЦСУ должно поддерживаться непрерывно и автоматически;
- объем синхрогруппы в цикле передачи при заданном времени восстановления синхронизма должен быть минимальным;
- приемник синхросигнала должен быть помехоустойчивым и среднее время между сбоями синхронизма должно быть по возможности большим.

Выполнение указанных выше требований должно сочетаться с простотой технической реализации, экономичностью и надежностью оборудования систем управления.

Раздел 8: Принципы регенерации цифровых сигналов

Цифровой сигнал, проходя по линии связи, ослабляется, искажается и подвергается воздействию различных помех, что приводит к изменению формы и длительности импульсов, уменьшению их амплитуды и случайным временным сдвигам. Поэтому для восстановления параметров цифрового сигнала в линейном тракте ЦСУ с ИКМ через определенные расстояния устанавливаются регенераторы, т.е. устройства, полностью восстанавливающие параметры ЛЦС.

В процессе регенерации (восстановления) цифрового сигнала выполняются следующие основные операции:

- усиление восстанавливаемых импульсов, так как при прохождении по линии связи они испытали затухание;
- коррекция формы импульсов, так как при прохождении цифрового сигнала по линии связи из-за неидеальности амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик форма импульсов линейного сигнала искажается;
- сравнение усиленных и откорректированных импульсов с пороговым значением для определения наличия или отсутствия сигнала на фоне помех;
- стробирование импульсов, в результате которого создаются такие условия, при которых импульсы цифрового сигнала на выходе регенератора формируются в строго определенные моменты;
- формирование новых импульсов с заданными параметрами и в определенные моменты времени.

Структурная схема регенератора и временные диаграммы, поясняющие его работу, приведены на рис. 8.1 и 8.2 соответственно, где приняты следующие обозначения:

ВУ - входное устройство, предназначенное для согласования входного сопротивления линии с входным сопротивлением регенератора; КУ - корректирующий усилитель, предназначенный для компенсации затухания регенерационного участка и коррекции амплитудно-частотных искажений, вносимых линией, и тем самым коррекции формы импульсов для полного или частичного устранения влияния одних импульсов на другие; ПУ - пороговое устройство, предназначенное для определения превышения сигнала над помехами; если амплитуда импульса больше $U_{пор}$, то на выходе порогового устройства появляется импульс, если же амплитуда импульса меньше $U_{пор}$, то на выходе порогового устройства импульс не появляется; импульсы с выхода ПУ подаются на решающее устройство (РУ); ВТЧ - выделитель тактовой частоты, предназначенный для формирования коротких стробирующих импульсов; стробирующие импульсы фазируются относительно входных символов таким образом, что в середине тактовых интервалов, где амплитуда входных импульсов максимальна; стробирующие импульсы подаются на второй вход решающего устройства; РУ - решающее устройство, необходимое для опробывания (стробирования) в каждом такте поступающих символов; если в момент прихода на РУ стробирующего импульса с выхода ВТЧ поступает импульс с выхода ПУ, то на выходе РУ появляется импульс, т.е. фиксируется «1» информационного сигнала; если же в момент поступления стробирующих импульсов с выхода ВТЧ на вход РУ импульс не поступает, то на выходе РУ импульс не появляется, т.е. фиксируется «0» информационного сигнала; ФВИ - формирователь выходных импульсов, т.е. формирование их амплитуды, длительности и взаимного временного соотношения между символами ЛЦС, следующих с тактовой частотой; Вых. ус-во - выходное устройство, предназначенное для согласованного подключения регенератора к линии связи.

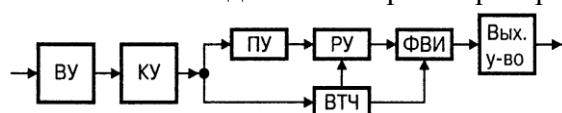


Рис. 8.1 – Структурная схема регенератора

ЛЦС (см. рис. 8.2, а) с выхода тракта передачи окончательной конечной станции или предыдущего регенератора поступает в линию. При своем прохождении по линии сигнал испытывает затухание, искажения и воздействие помех. Сигнал на

входе корректирующего усилителя регенератора или регенератора тракта приема окончательной

станции имеет вид, показанный на рис. 8.2, б. Отметим, что регенераторы тракта приема оконечных станций называются *станционными регенераторами*, а регенераторы, устанавливаемые по линии связи, называются *линейными регенераторами*. Сигналы на выходе корректирующего усилителя показаны на рис. 8.2, в. Если на входе порогового устройства (ПУ) сигнал превышает пороговое значение $U_{\text{пор}}$, то на выходе ПУ появляется сигнал, условно показанный на рис. 8.3, г. С выхода ПУ сигналы поступают на один из входов решающего устройства (РУ), на другой вход которого поступают стробирующие импульсы с выхода выделителя тактовой частоты (ВТЧ). При совпадении символов «1» на входе РУ со стробирующими импульсами на выходе РУ появляются символы, соответствующие «1» (см. рис. 8.2, е). Эти символы поступают на вход ФВИ, где восстанавливаются первоначальные амплитуда и длительность импульсов ЛЦС (см. рис. 8.2, ж).

Синхронизация работы ФВИ от ВТЧ обеспечивает устранение флуктуации временного положения импульсов, возникающих в процессе их передачи. Эти флуктуации называются *фазовыми дрожаниями*.

Из описания принципа действия регенератора ЦСУ, можно выделить основные особенности его технической реализации, которые обеспечивают минимум ошибок в работе:

- частотные характеристики (ЧХ) усиления корректирующего усилителя должна соответствовать ЧХ затухания регенерационного участка;
- на выходе усилителя должно быть обеспечено максимальное отношение сигнал/шум;
- оптимальный выбор значения порогового напряжения $U_{\text{пор}}$;
- кратковременность стробирования, осуществляемого в момент достижения импульсом на входе порогового устройства наибольшего значения. Таким образом, помехи, амплитуда которых не превысит $U_{\text{пор}}$, не вызовут ошибочного решения РУ, и помехи, превышающие $U_{\text{пор}}$, но не совпадающие с моментами стробирования, также, не приведут к ошибкам.

Основным показателем качества работы регенератора является вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$. Ошибка в решении происходит тогда, когда напряжение шума превосходит значение порогового напряжения на входе ПУ и для случая белого гауссовского шума вероятность ошибки равна

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} e^{-t^2/2\sigma^2} dt,$$

где $U_{\text{пор}}$ - пороговое напряжение; σ^2 - мощность шума на входе ПУ. Мерой помехоустойчивости регенератора является отношение сигнал/шум на входе порогового устройства или *защищенность*

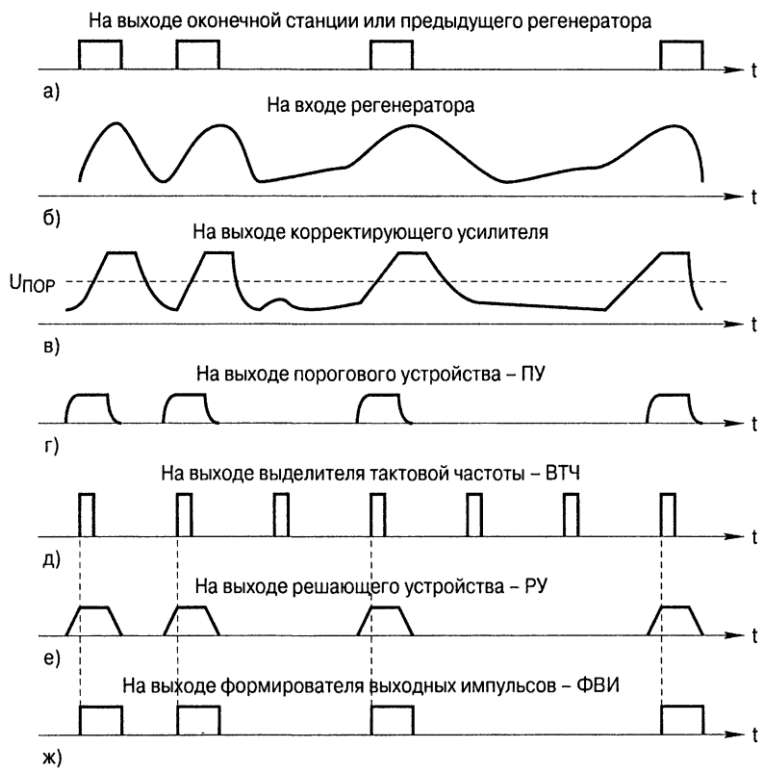


Рис. 8.2 – Временные диаграммы работы регенератора

Цифровые сигналы передаются по разным линиям связи - кабельным (электрическим и волоконно-оптическим), радиорелейным и спутниковым. В зависимости от используемой среды распространения сигналам в линии придают различный вид, при котором параметры сигнала в наибольшей степени согласованы с параметрами линии связи. Эта операция называется *линейным кодированием*, при котором символы «1» и «0» информационного сигнала заменяются цифровым сигналом, характеристики которого в большей степени соответствуют параметрам линии. Полученный в результате линейного кодирования цифровой сигнал называется *линейным кодом*.

К линейным кодам предъявляются следующие требования:

- однозначность декодирования, т.е. из ЛЦС должна однозначно формироваться исходная последовательность двоичных символов;
- в энергетическом спектре ЛЦС должны быть ослаблены низкочастотные и высокочастотные составляющие;
- в ЛЦС должна быть обеспечена высокая плотность импульсов, т.е. число импульсов, определяющих тактовые интервалы, должно быть существенно больше числа пробелов («нулей»).

В зависимости от используемой среды распространения применяют различные линейные коды. В радиорелейных и спутниковых линиях, например, используют различные виды фазовой или частотной манипуляции. В линиях связи электрических кабелей распространена передача цифровых сигналов импульсами постоянного тока. При этом сигналы в линии могут быть двухуровневыми и многоуровневыми, из последних чаще всего применяются трехуровневые сигналы. Двухуровневые сигналы могут принимать в процессе кодирования значения напряжения «+» или «-», трехуровневые сигналы принимают значения «+», «-» и «0» (пробел). Линейные коды цифровых волоконно-оптических систем передачи представляют двухуровневые сигналы, принимающие в процессе кодирования значения «+» или «0» (пробел).

В ряде случаев для исключения из цифрового сигнала длинных последовательностей одинаковых символов, а также периодически повторяющихся пачек символов исходный двоичный сигнал перед линейным кодированием подвергается дополнительному перекодированию, при котором ему придаются свойства случайного потока. Операция, совершаемая при этом, называется *скремблированием* сигнала и состоит в суммировании по «модулю 2» с исходным сигналом *псевдослучайных последовательностей* (ПСП), содержащих определен-

$$A_3 = 201g \frac{U_m}{\sigma}$$

Здесь U_m - максимальное значение амплитуды импульса на входе порогового устройства.

Непосредственное определение вероятности ошибок основано на измерении *коэффициента ошибок* (КО), который определяется частотой их появления и служит оценкой вероятности ошибок.

КО определяется отношением числа элементов цифрового сигнала, принятых с ошибками к общему числу элементов, принятых в течение времени измерений:

$$K_{ош} = N_{ош} / N = N_{ош} / VT,$$

где $N_{ош}$ - число ошибочно принятых элементов (символов); N - общее число принятых элементов; V - скорость передачи; T - время измерения.

ное (равное 2^{n-1} , где n - целое) число символов. Эти последовательности, будучи в действительности детерминированными, удовлетворяют трем критериям случайности:

- в каждом периоде последовательности число символов «1» отличается от числа символов «0» не более, чем на единицу;

- в течение периода последовательности половина серий единиц и нулей имеет длину 1, одна четверть - 2, одна восьмая - 3 и т. д. до тех пор, пока это продолжение имеет смысл.

Опр. 1. *Серией* называется последовательность одинаковых цифр;

- если последовательность посимвольно сравнить с любым ее циклическим сдвигом в течение периода последовательности, то можно отметить, что число совпадений отличается от числа несовпадений не более, чем на единицу, а при сложении «по модулю 2» этой последовательности с ее циклическим сдвигом образуется новая циклическая перестановка исходной последовательности.

Например, при $n = 4$ псевдослучайная последовательность, удовлетворяющая указанным требованиям, имеет вид 000100110101111. Число символов в этой последовательности равно 15. Число единиц в ней равно 8, число нулей - 7, что удовлетворяет первому критерию. Вторым критерий также удовлетворяется, так как в этой последовательности имеется восемь различных серий, в том числе четыре серии единиц и четыре серии нулей. Из них две серии единиц и две серии нулей (4 из 8) имеют длину 1, по одной серии единиц и нулей имеют длину 2 (2 из 8) и одна серия из восьми содержит три нуля. Сдвинув последовательность на любое число символов и сравнив её с исходной, можно убедиться в справедливости критерия 3. Так, при сдвиге на три элемента

000100110101111

111000100110101 видим, что в этих строках символы совпадают 7 раз и не совпадают 8 раз. Сложение «по модулю 2», приводит к образованию последовательности 111100010011010, которая является циклической перестановкой исходной последовательности. Псевдослучайные последовательности, удовлетворяющие указанным трем критериям, называются последовательностями максимальной длины и формируются с помощью регистров сдвига с обратными связями. Отметим, что обычно выбирают $n > 10$, что соответствует длине ПСП более 1023 символов.

Опр. 2. Сигнал, образованный суммированием входного двоичного потока и периодически повторяемых последовательностей максимальной длины, сохраняет свойства псевдослучайного сигнала и называется *скремблированным*.

Вероятности появления символов «0» и «1» в нем одинаковы, поэтому вероятность образования серии из k нулей подряд равна $p = 0,5^k$. При $k = 20$ $p_{20} \approx 10^{-6}$. Такой сигнал обладает достаточно хорошими свойствами для выделения из него сигналов синхронизации.

При декодировании линейного скремблированного сигнала происходит вычитание ПСП-составляющей из суммарного цифрового сигнала и восстановление за счет этого исходного цифрового потока.

В системах управления на основе классической ИКМ с ВРК каждый отсчет (дискрет) входного квантованного сигнала кодируется независимо от всех остальных, т.е. кодируются произвольные случайные сигналы. Анализ управляющих сигналов показывает, однако, что при переходе от одного дискрета к другому проявляется значительная избыточность. Степень корреляции между соседними дискретами довольно значительная (коэффициент корреляции не менее 0,85). Следовательно, избыточность при классической ИКМ указывает на возможность значительной экономии полосы передаваемых частот за счет более эффективных методов кодирования.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Знакомство с лабораторной установкой «Изучение принципов временного разделения каналов»	3	-
2	2.	Исследование системы управления с амплитудно-импульсной модуляцией	4	-
3	3, 7.	Исследование системы управления с импульсно-кодовой модуляцией	4	-
4	8.	Исследование процессов коммутации и оценка помехозащищённости систем управления с временным разделением каналов	4	-
5	2, 3, 4, 5, 7, 8.	Срез знаний, полученных при выполнении лабораторных работ	3	решение проблем в группах смешанного состава (3 часа)
ИТОГО			18	3

4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Построение диаграммы измерительных уровней	3	-
2	2.	Расчёт параметров участка передачи	4	-
3	3.	Построение спектральной диаграммы амплитудно-модулированного сигнала	4	-
4	7, 8	Построение спектральной диаграммы импульсно-кодового сигнала	4	-
5	5	Равномерное квантование и кодирование сигнала в восьмиразрядном симметричном коде	3	разбор конкретных ситуаций (3 часа)
ИТОГО			18	3

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрены.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	Σ <i>комп.</i>	t_{cp} , час	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ПК</i>				
			6				
1	2	3	4	5	6	7	
1. Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах		16	+	1	16	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
2. Цифровая обработка сигналов		15	+	1	15	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
3. Равномерное квантование		14	+	1	14	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
4. Неравномерное квантование		8	+	1	8	Лк, СРС	Экзамен
5. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов		16	+	1	16	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
6. Обобщённая структурная схема ЦСУ		9	+	1	9	Лк, СРС	Экзамен
7. Типы синхронизации в ЦСУ		15	+	1	15	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
8. Принципы регенерации цифровых сигналов		15	+	1	15	ЛК, ЛР, ПЗ, СРС	Экзамен
<i>всего часов</i>		108		1	108		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Ким, Д.П. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / Д.П. Ким. - М.: Физматлит Т.2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - 2004. - 464 с.;
2. Музыкаева И. В. Элементная база для построения цифровых систем управления : учеб. пособие для вузов / И. В. Музыкаева. - Москва : Техносфера, 2006. - 144 с.;
3. Савин, М.М. Теория автоматического управления : учеб. пособие для вузов / М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. - 469 с.

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Авдоченко, Б.И. Цифровые и аналоговые быстродействующие устройства : курс лекций / Б.И. Авдоченко. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 165 с.; То же [Электронный ресурс]. – URL://biblioclub.ru/index/php?page=book&id=208592	Лк	ЭР	1,0
2.	Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / А.А. Ерофеев. - 2-е изд., доп. и перераб.. - СПб.: Политехника, 2005. – 302 с.	Лк, ЛР	25	1,0
3.	Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы: учебное пособие / И.В. Мирошник. - СПб.: Питер, 2006. – 272 с.	ЛР	16	1,0
4.	Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / В.Я. Ротач. - 3-е изд, стереотип.. - М.: МЭИ, 2005. – 400 с.	ЛР	20	1,0
5.	Теория автоматического управления: Учебник для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; Под ред. В.Б. Яковлева. - 2-е изд., перераб.. - М.: Высш. школа, 2005. – 567 с.	Лк	31	1,0
6.	Цветкова, О.Л. Теория автоматического управления : учебник / О.Л. Цветкова. – М.; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 207 с.: ил., схем., табл. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-8334-7; То же [Электронный ресурс]. – URL://biblioclub.ru/index/php?page=book&id=443415	Лк	ЭР	1,0
7.	Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 232 с.	Лк, ЛР	20	1,0
Дополнительная литература				
8.	Анхимюк, В.Л. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко, Н.Н. Михеев. - 2-е изд., испр.. - Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 352 с.	Лк	4,0	0,3
9.	Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / А.С. Вострикова, Г.А. Французова. - 2-е изд., стереотип.. - М.: Высш. школа, 2006. – 365 с.	Лк	14	0,9

10.	Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.	ПЗ	7	0,4
11.	Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. [Электронный ресурс] / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2016. – 464 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/71744 - Загл. с экрана	ПЗ	ЭР	1,0
12.	Ковров, А.Е. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.	ЛР	99	1,0
13.	Певзнер, Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.	ПЗ	15	1,0
14.	Подчукаев, В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы): Учебник для вузов / В.А. Подчукаев. - М.: Физматлит, 2005. – 392 с.	Лк	5	0,3

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com>.
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru>.
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/>.
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/практических занятий

Лабораторная работа №1

Знакомство с лабораторной установкой «Изучение принципов временного разделения каналов»

Цель работы:

1. Знакомство с лабораторной установкой «Изучение принципов временного разделения каналов».

Порядок выполнения:

1. Изучить схему установки «Изучение принципов временного разделения каналов», вынесенную на лицевую панель;
2. Подключить двухканальный осциллограф С1-220;
3. Выполнить с помощью шнуров и клемм соединения между блоками и к контрольным точкам;
4. Подать на входы три различных по форме испытательных сигнала F_1 , F_2 , F_3 ;
5. Проанализировать осциллограммы на выходах блоков системы;
6. Провести необходимые измерения с использованием временных меток.

Форма отчетности:

Отчёт сдаётся в печатном виде. В отчёте должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и цель её проведения;
2. Блок-схема измерений, с указанием точек, в которых проведены измерения осциллограмм;
3. Результаты измерений в графической форме – осциллограммы, расположенные таким образом, чтобы на них были отмечены все временные соотношения между исследуемыми сигналами;
4. Значения измеренных величин;
5. Основные выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения к лабораторной работе [7, с. 7-9].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 232 с.

Дополнительная литература

2. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чём преимущества проведения необходимых измерений длительности сигналов с использованием временных меток?
2. Почему входы осциллографа I, II используются в режиме работы с внешней синхронизацией?

Лабораторная работа №2

Исследование системы управления с амплитудно-импульсной модуляцией

Цель работы:

1. Знакомство с функциональной схемой лабораторной установки «Изучение принципов временного разделения каналов»;
2. Изучение принципов построения системы связи с временным разделением каналов, использующей амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ);
3. Анализ процессов формирования сигнала с АИМ;

4. Изучение принципов формирования группового сигнала при использовании АИМ;
5. Изучение принципов разделения каналов в системе связи с АИМ;
6. Анализ процессов восстановления сигнала с АИМ.

Порядок выполнения:

1. Изучить схему установки «Изучение принципов временного разделения каналов», вынесенную на лицевую панель;
2. Подготовить лабораторную установку к проведению измерений;
3. Провести измерение двух интервалов между метками времени, которые используются в данном лабораторном макете;
4. Проанализировать формирование дискретного сигнала с АИМ;
5. Исследовать принцип формирования временного разделения каналов (ВРК);
6. Исследовать процесс формирования группового сигнала;
7. Проконтролировать процесс разделения каналов с АИМ;
8. Проанализировать процесс восстановления аналогового сигнала.

Форма отчетности:

Отчёт сдаётся в печатном виде. В отчёте должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и цель её проведения;
2. Блок-схема измерений, с указанием точек, в которых проведены измерения осциллограмм;
3. Результаты измерений в графической форме – осциллограммы, расположенные таким образом, чтобы на них были отмечены все временные соотношения между исследуемыми сигналами;
4. Значения измеренных величин;
5. Основные выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения к лабораторной работе [10, с. 7-9].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / А.А. Ерофеев. - 2-е изд., доп. и перераб.. - СПб.: Политехника, 2005. – 302 с.

Дополнительная литература

2. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Объясните, в чём заключается принцип временного разделения каналов.
2. Укажите, какой элемент схемы лабораторного стенда производит АИМ модуляцию. Объясните принцип АИМ модуляции.

Лабораторная работа №3

Исследование системы управления с импульсно-кодовой модуляцией

Цель работы:

Целью работы является изучение следующих вопросов:

1. Принципов построения системы связи с ВРК и импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ);
2. Процесса формирования ИКМ сигнала;
3. Принципов формирования группового сигнала при временном уплотнении линии связи с использованием ИКМ;
4. Принципов разделения каналов в системе связи с ИКМ;

5. Принципов восстановления аналогового сигнала.

Порядок выполнения:

1. Подготовить лабораторную установку к проведению работы;
2. Исследовать процесс формирования цифрового ИКМ сигнала;
3. Исследовать процесс формирования группового сигнала на выходе мультиплексора;
4. Проконтролировать процесс разделения сигналов с ИКМ;
5. Проанализировать процесс восстановления аналогового сигнала.

Форма отчетности:

Отчёт сдаётся в печатном виде. В отчёте должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и цель её проведения;
2. Блок-схема измерений, с указанием точек, в которых проведены измерения осциллограмм;
3. Результаты измерений в графической форме – осциллограммы, расположенные таким образом, чтобы на них были отмечены все временные соотношения между исследуемыми сигналами;
4. Значения измеренных величин;
5. Основные выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения к лабораторной работе [10, с. 14-16].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем и седьмом разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы: учебное пособие / И.В. Мирошник. - СПб.: Питер, 2006. – 272 с.

Дополнительная литература

2. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какую роль играют мультиплексор на передаче и демультимплексор на приёме?
2. Каким образом на приёмном конце происходит преобразование АИМ сигнала в исходный аналоговый сигнал?

Лабораторная работа №4

Исследование процессов коммутации и оценка помехозащищённости систем управления с временным разделением каналов

Цель работы:

1. Качественная оценка помехозащищённости систем связи при АИМ и ИКМ;
2. Изучение принципов построения устройств, позволяющих осуществлять пространственную коммутацию каналов систем связи.

Порядок выполнения:

1. Подготовить лабораторную установку к проведению измерений;
2. Оценить помехоустойчивость системы связи с АИМ сигналами;
3. Оценить помехоустойчивость системы связи при использовании сигналов с ИКМ;
4. Изучить принцип пространственной коммутации.

Форма отчетности:

Отчёт сдаётся в печатном виде. В отчёте должны присутствовать:

1. Номер, название лабораторной работы и цель её проведения;
2. Блок-схема измерений, с указанием точек, в которых проведены измерения осциллограмм;
3. Результаты измерений в графической форме – осциллограммы, расположенные таким образом, чтобы на них были отмечены все временные соотношения между исследуемыми сигналами;
4. Значения измеренных величин;
5. Основные выводы по работе.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения к лабораторной работе [10, с. 20-23].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в восьмом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / В.Я. Ротач. - 3-е изд, стереотип.. - М.: МЭИ, 2005. – 400 с.

Дополнительная литература

2. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Укажите преимущества ВРК в сравнении с частотным.
2. Сравните помехоустойчивость сигналов с АИМ и ИКМ.
3. Объясните принцип пространственной коммутации.

Лабораторная работа №5

Срез знаний полученных при выполнении лабораторных работ

Лабораторная работа проводится в интерактивной форме с решением проблем в группах смешанного состава (3 час.)

Цель работы:

Проверить уровень остаточных знаний, полученных при выполнении лабораторных работ.

Порядок выполнения:

Обучающиеся письменно отвечают на вопросы преподавателя. По результатам проведения лабораторной работы выставляются оценки «зачтено» или «незачтено» в соответствии с критериями оценивания компетенций, приведёнными в приложении 4.

Форма отчетности:

Бланк ответа обучающегося, утверждённой формы ФГБОУ ВО «БрГУ».

Задания для самостоятельной работы:

Изучить основные теоретические положения к лабораторным работам [10, с. 3, с. 7-9, с. 14-16, с. 20-23].

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором, третьем, пятом, седьмом и восьмом разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком,

2005. – 232 с.

Дополнительная литература

2. Исследование принципов временного разделения каналов: методические указания к выполнению лабораторных работ / А.Е. Ковров. – Братск: БрГУ, 2009. – 27 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

Контрольные вопросы для самопроверки к лабораторным работам 1-4.

Практическое занятие №1

Построение диаграммы измерительных уровней

Цель работы:

Приобрести навыки построения внешней диаграммы измерительных уровней канала передачи.

Задание:

1. Рассчитать уровни передачи в контрольных точках канала;
2. Построить диаграмму измерительных уровней.

Порядок выполнения:

Изучить теоретические данные. Исходными данными для выполнения задания являются: усиление промежуточных усилителей S_i , измерительный уровень на выходе оконечного оборудования $r_{пер}$, уровень передачи на входе и выходе канала $r_{к.вх}$, $r_{к.вых}$, затухание участков цепи A_i . Определить уровень передачи i -го усилителя $r_{пер.i}$. Рассчитать уровень приёма на входе i -го усилителя $r_{пр.i}$. В соответствии с полученными значениями $r_{пр.i}$ и $r_{пер.i}$ построить внешнюю диаграмму измерительных уровней канала передачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы;
2. Задание;
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта;
4. График зависимости уровней передачи от контрольных точек $p = f(i)$.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом обучающегося.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.

Дополнительная литература

2. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое уровень передачи по мощности, напряжению и току?
2. Приведите соотношения между относительными и абсолютными уровнями передачи.

Практическое занятие №2

Расчёт параметров участка передачи

Цель работы:

Приобрести навыки расчета параметров участка передачи.

Задание:

1. Рассчитать параметры передачи для первого промежуточного усилителя;
2. Повторить расчёты для промежуточных усилителей Ус2 и Ус3.

Порядок выполнения:

Изучить теоретические данные. Исходными данными для выполнения задания являются: измерительный уровень на выходе $p_{пер}$, входное сопротивление промежуточных усилителей $R_{вх.i}$, затухание i -го участка цепи A_i . В соответствии с заданием необходимо рассчитать для первого промежуточного усилителя Ус1: уровень передачи по мощности $p_{м1}$, мощность сигнала на входе $W_{с1}$, уровень передачи по напряжению $p_{н1}$, напряжение эквивалентного источника ЭДС $U_{э1}$, напряжение измерительного сигнала U_1 , мощность измерительного сигнала $W_{ис1}$, уровень мощности измерительного сигнала $p_{ис.м1}$, мощность сигнала на выходе оконечного оборудования передачи $W_{ооп.i}$, величину, показывающую во сколько раз уменьшается мощность сигнала при прохождении по i -му участку, остаточное затухание A_r . Выполнить расчёты перечисленных величин для промежуточных усилителей Ус2, Ус3. Указать, на каком усилительном участке будет внесена наибольшая собственная помеха.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы;
2. Задание;
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом обучающегося.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.

Дополнительная литература

2. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чём различие между относительным, абсолютным и измерительным уровнями передачи?
2. Что характеризует остаточное затухание и как его определить по диаграмме уровней передачи?

Практическое занятие №3

Построение спектральной диаграммы амплитудно-модулированного сигнала

Цель работы:

Приобрести навыки расчёта и построения спектральной диаграммы амплитудно-модулированного сигнала (АМ-сигнала).

Задание:

1. Рассчитать и построить спектральную диаграмму АМ-сигнала;
2. Рассчитать и построить спектральную диаграмму группового сигнала.

Порядок выполнения:

Изучить теоретические данные. Исходными данными для выполнения задания являются: Мощность несущей частоты W_0 , несущие частоты первого и второго преобразования f_{01} f_{02} , боковые полосы, выделяемые полосовыми фильтрами, границы полосы частот, номинал несущей частоты $f_{ном}$, глубина амплитудной модуляции m , количество каналов n_k . В соответствии с заданием необходимо определить: мощности боковой полосы частот W_6 , АМ-сигнала W_{AM} и их отношение, граничные частоты после АМ и полосовых фильтров, номинал несущей частоты f_k , нижние f_n и верхние f_v частоты сигнала n -го канала. Построить графики зависимости $A = \varphi(f)$ для АМ-сигнала и группового сигнала n -канальной системы.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы;
2. Задание;
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта;
4. Графики зависимости $A = \varphi(f)$ для АМ-сигнала и группового сигнала n -канальной системы.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом обучающегося.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.

Дополнительная литература

2. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в МАТЛАВ : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Приведите структурную схему передачи АМ-сигнала.
2. Перечислите методы передачи АМ-сигнала.

Практическое занятие №4

Построение спектральной диаграммы импульсно-кодированного сигнала

Цель работы:

Приобрести практические навыки расчета и построения спектральной диаграммы импульсно-кодированного сигнала (ИК-сигнала).

Задание:

1. Рассчитать параметры ИК-сигнала;
2. Построить спектральную диаграмму ИК-сигнала.

Порядок выполнения:

Изучить теоретические данные. Исходными данными для выполнения задания являются: число каналов N , нижняя f_n и верхняя f_v граничные частоты спектра. Определить в соответствии с теоремой Котельникова частоту дискретизации F_d . Рассчитать канальный интервал τ_{ki} . Найти количественное значение нижних $f_{n,n}$, $f_{n,v}$ и верхних $f_{v,n}$, $f_{v,v}$ частот нижней и верхней боковых полос для трёх каналов. Построить график зависимости $A = \varphi(f)$ для ИК-сигнала.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы;
2. Задание;
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта;
4. График зависимости $A = \varphi(f)$.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом обучающегося.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в седьмом и восьмом разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.

Дополнительная литература

2. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте теорему Котельникова.
2. Каким образом рассчитываются период дискретизации, канальный интервал?

Практическое занятие №5

Равномерное квантование и кодирование сигнала в восьмиразрядном симметричном коде

Занятие проводится в интерактивной форме с разбором конкретных ситуаций (3 час.)

Цель работы:

Приобрести практические навыки квантования и кодирования сигнала проектируемой системы.

Задание:

1. Выполнить операции равномерного квантования и кодирования;
2. Изобразить полученные кодовые комбинации.

Порядок выполнения:

Изучить теоретические данные. Исходными данными для выполнения задания являются: амплитуды отсчетов первого и второго сигналов U_1 , U_2 , шаг квантования δ , защищенность от шума квантования $A_{кв}$. В соответствии с заданием определить: число отсчетов аналогового сигнала n , структуру кодовой комбинации в виде PXYZABCD, величину ошибки квантова-

ния Δ , минимальное количество разрядов в кодовом слове m , напряжение шума квантования $U_{ш.кв}$, тактовую частоту двоичного импульсно-кодового модулируемого сигнала f_T . Изобразить полученные в результате кодирования кодовые комбинации j_1 и j_2 в виде последовательности токовых и бестоковых посылок.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы;
2. Задание;
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта;
4. Графики зависимости $b=f(n)$.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом обучающегося.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Певзнер. - Москва : Высшая школа, 2006. - 590 с.

Дополнительная литература

2. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 464 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Поясните суть равномерного квантования.
2. Для чего необходимо определять тактовую частоту в многоканальной системе?

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. ОС Windows 7 Professional.
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level.
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.
4. MATLAB Academic new Product Concurrent Licenses.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ПЗ и ЛР</i>
1	3	4	5
ПЗ	Дисплейный класс	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	ПЗ 1-5
ЛР	Телекоммуникаций и теории электросвязи	Лабораторная установка «Изучение принципов временного разделения каналов», 2шт. осциллограф, 2 шт.	ЛР 1-4
СР	ЧЗ №3	Оборудование 15 -	-

		CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S- SF);принтер HP LaserJet P3005	
--	--	--	--

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-6	Способность производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматизации, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления	1. Общие сведения о дискретных автоматических системах	1.1. Цели и задачи курса ЦСУ	Экзаменационные вопросы 1.1
			1.2. Квантование по времени и по уровню	Экзаменационные вопросы 1.2
			1.3. Типы импульсной модуляции	Экзаменационный вопрос 1.3
			1.4. Исследование динамики дискретных систем	Экзаменационный вопрос 1.4
			1.5. Амплитудно-импульсный элемент и его эквивалентное представление	Экзаменационный вопрос 1.5
			1.6. Формирующее звено	Экзаменационный вопрос 1.6
			1.7. Эквивалентная схема разомкнутой импульсной системы	Экзаменационный вопрос 1.7
		2. Цифровые методы обработки сигналов	2.1. Постановка задачи	Экзаменационный вопрос 2.1
		2.2. Квантование сигналов по уровню	Экзаменационный вопрос 2.2	
		3. Равномерное квантование	3.1. Равномерное квантование	Экзаменационные вопросы 3.1, 3.2
		4. Неравномерное квантование	4.1. Неравномерное квантование	Экзаменационные вопросы 4.1-4.4
		5. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования сигналов	5.1. Энергетический спектр шума квантования	Экзаменационный вопрос 5.1
		5.2. Кодирование квантованных сигналов	Экзаменационные вопросы 5.2, 5.3	
		6. Обобщенная структурная схема ЦСУ	6.1. Обобщенная структурная схема ЦСУ	Экзаменационные вопросы 6.1, 6.2
		7. Типы синхронизации в ЦСУ	7.1. Типы синхронизации в ЦСУ	Экзаменационные вопросы 7.1-7.3
		8. Принципы регенерации цифровых сигналов	8.1. Принципы регенерации цифровых сигналов	Экзаменационные вопросы 8.1-8.3

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ПК-6	Способность производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления	1.1. Цели и задачи курса ЦСУ	1. Общие сведения о дискретных автоматических системах
			1.2. Квантование по времени и по уровню	
			1.3. Типы импульсной модуляции	
			1.4. Исследование динамики дискретных систем	
			1.5. Амплитудно-импульсный элемент и его эквивалентное представление	
			1.6. Формирующее звено	
			1.7. Эквивалентная схема разомкнутой импульсной системы	2. Цифровые методы обработки сигналов
			2.1. Постановка задачи	
			2.2. Квантование сигналов по уровню	3. Равномерное квантование
			3.1. Мощность квантования, ОСШК, порог ограничения при равномерном квантовании	
			3.2. Защищённость от шумов при равномерном квантовании	4. Неравномерное квантование
			4.1. Амплитудная характеристика квантующего устройства при неравномерном квантовании	
			4.2. ОСШК при неравномерном квантовании	
			4.3. μ -закон компандирования	
			4.4. Определение выигрыша защищённости при неравномерном квантовании	5. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования сигналов
			5.1. Энергетический спектр шума квантования	
			5.2. Процесс кодирования сигналов	
			5.3. Натуральный двоичный код, код Грея, симметричный код	6. Обобщённая структурная схема ЦСУ
			6.1. Структурная схема ЦСУ	
			6.2. Образование группового сигнала в ЦСУ	7. Типы синхронизации в ЦСУ
			7.1. Энергетический спектр цифрового сигнала	
			7.2. Цикловая синхронизация	
			7.3. Система цикловой синхронизации	8. Принципы регенерации цифровых сигналов
8.1. Основные операции в процессе восстановления цифрового сигнала				
8.2. Структурная схема регенератора				
8.3. Временные диаграммы работы регенератора				

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - способы классификации ЦСУ; <p>Уметь (ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления; <p>Владеть (ПК-6):</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками выбора стандартных средств автоматизации, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления. 	отлично	Обучающийся должен во время ответа показать знания: способов классификации ЦСУ, основных типов модуляции, базовых терминов, используемых в научно-технической литературе по цифровой обработке сигналов. Обучающийся должен иметь навыки владения: выбора стандартных средств автоматизации для проектирования ЦСУ, понимания материала и способности высказывания мыслей на научно-техническом языке. Обучающийся во время ответа должен продемонстрировать умения производить расчёты как отдельных блоков так и всей ЦСУ в целом.
	хорошо	Ответ содержит неточности. Дополнительные вопросы требуются, но студент с ними справляется отлично.
	удовлетворительно	Ответил только на один вопрос, либо слабо ответил на оба вопроса. На дополнительные вопросы отвечает неуверенно
	неудовлетворительно	На оба вопроса обучающийся отвечает неуверенно. На дополнительные вопросы преподавателя также не может ответить.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина «Цифровые системы управления» направлена на формирование у обучающихся знаний и навыков использования современных технологий и методов цифровой обработки сигналов систем управления для решения практических задач с использованием современных цифровых регуляторов, необходимых в дальнейшем при проектировании и эксплуатации систем автоматизации.

Изучение дисциплины предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- практические занятия;
- самостоятельную работу;
- экзамен.

В ходе освоения раздела 1 «Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах» обучающиеся должны уяснить: дискретизацию непрерывного сигнала по времени, уровню, и по времени и по уровню, типы импульсной модуляции, назначение амплитудно-импульсного элемента.

В ходе освоения раздела 2 «Цифровые методы обработки сигналов» обучающиеся должны знать: три этапа обработки сигналов в ЦСУ, особенности квантования сигналов по уровню,

амплитудную характеристику квантующего устройства.

В ходе освоения раздела 3 «Равномерное квантование» обучающиеся должны уяснить: сущность равномерного квантования, защищённость от шумов квантования.

В ходе освоения раздела 4 «Неравномерное квантование» обучающиеся должны знать: три способа реализации неравномерного квантования, μ -закон компандирования, А-закон компандирования.

В ходе освоения раздела 5 «Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов» обучающиеся должны уяснить: энергетический спектр шумов квантования, двоичную систему кодирования, типы двоичных кодов.

В ходе освоения раздела 6 «Обобщённая структурная схема ЦСУ» обучающиеся должны знать: структурную схему ЦСУ на основе ИКМ-ВРК, механизм образования группового сигнала.

В ходе освоения раздела 7 «Типы синхронизации в ЦСУ» обучающиеся должны уяснить: энергетический спектр группового цифрового сигнала, структурную схему и принцип работы системы цикловой синхронизации.

В ходе освоения раздела 8 «Принципы регенерации цифровых сигналов» обучающиеся должны знать: структурную схему регенератора, временные диаграммы работы регенератора.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление основных теоретических положений дисциплины, оценка их применимости и сопоставление с результатами эксперимента, а также приобретение навыков моделирования отдельных функциональных узлов ЦСУ.

В ходе выполнения практических занятий обучающиеся приобретают навыки расчёта параметров передачи сигнала в системе управления.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам: типы импульсной модуляции, структурная схема разомкнутой импульсной системы, структурная схема ЦСУ.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой литературы. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (лекции с текущим контролем, лабораторные работы и практические занятия с разбором конкретных ситуаций) в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ

рабочей программы дисциплины

Цифровые системы управления

1. Цель и задачи дисциплины

Целью дисциплины является изложение базовых принципов математического моделирования цифровых систем управления для обеспечения желаемых динамических свойств; основных свойств динамики дискретных объектов, принципов построения и функционирования основных элементов ЦСУ.

Задачей дисциплины является подготовка обучающихся к самостоятельной работе по решению практических задач, связанных с расчётом и моделированием ЦСУ, которые специалист будет использовать в производственной деятельности, связанной с эксплуатацией, настройкой и разработкой технических систем.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 18 час.; ЛР – 18 час.; ПЗ – 18; СР – 54 час.

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 144 часов, 4 зачётные единицы.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Введение. Общие сведения о дискретных автоматических системах;
2. Цифровая обработка сигналов;
3. Равномерное квантование;
4. Неравномерное квантование;
5. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов;
6. Обобщённая структурная схема ЦСУ;
7. Типы синхронизации в ЦСУ;
8. Принципы регенерации цифровых сигналов.

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ПК-6 – способность производить расчёты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления.

4. Вид промежуточной аттестации: экзамен.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 201___ - 201___ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «___» _____ 201___ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись) *(Ф.И.О.)*