



Организация  
Объединенных Наций по  
вопросам образования,  
науки и культуры



Международный  
центр компетенций  
в горнотехническом образовании  
под эгидой ЮНЕСКО

**Международная специальная краткосрочная программа  
Международного центра компетенций в горнотехническом  
образовании под эгидой ЮНЕСКО**

**РАЗРАБОТАНА В РАМКАХ СОДЕЙСТВИЯ ЭКСПОРТА  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ**

**«РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ»**

**Уровень программы: общий**

**Форма обучения: очная**

**Объем программы: 68 часов**

**Руководитель  
программы:**

к.т.н., асс. Мартиросян А.В

**Составитель  
программы:**

к.т.н., асс. Мартиросян А.В



ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

## **1 Общие положения**

### **1.1 Цель программы:**

Цель программы – приобретение знаний о закономерностях и свойствах процессов управления технологическими процессами и объектами независимо от их физической природы; получить представление о современных средствах автоматизации и управления при решении инженерных и управленческих задач, о разработке современных систем управления различными промышленными механизмами, агрегатами и технологическими комплексами для различных отраслей промышленности.

### **1.2 Основные задачи программы**

Получение дополнительных знаний в области:

- применения информационных технологий обоснования решений по управлению организационно-техническими системами;
- формирования систем исходных данных для поддержки принятия управленческих решений в организационно-технических системах;
- постановки и решения задач оценивания эффективности функционирования организационно-технических систем методами системного анализа;
- прогнозирования динамики развития организационно-технических систем с применением моделирующих систем;
- организации экспертизы организационно-технических систем, а также экспертной оценки управленческих решений в организационно-технических системах.

### **1.3 Категория слушателей:**

Студенты и аспиранты, обучающиеся по направлениям подготовки, связанным с разработкой и анализом систем управления.

### **1.4 Планируемые результаты обучения**

Перечень дополнительных профессиональных компетенций, качественное изменение которых осуществляется в результате реализации программы обучения:

- способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;
- готовность применять методы математики, физики, химии, системного анализа, теории управления, теории знаний, теории и технологии программирования, а также методов гуманитарных, экономических социальных наук;
- способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств, с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления;
- 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 в соответствии с техническим заданием;
- способность принимать научно-обоснованные решения на основе математики, физики, химии, информатики, экологии, методов системного анализа и теории управления, теории знаний, осуществлять постановку и выполнять эксперименты по проверке их корректности и эффективности;

### **1.5 Требования к результатам освоения программы:**

С целью достижения указанных в п. 1.4 дополнительных профессиональных компетенций, слушатели в процессе освоения Краткосрочной программы должны:

### **Получить знания в следующих областях:**

- принципы составления аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам работы, подготовке публикаций по результатам исследований и разработок;

- знает естественнонаучную сущность проблем, возникающих в профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

- знает принципы вычислительного эксперимента с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления;

- знает 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 в соответствии с техническим заданием вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления;

- знает 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 в соответствии с техническим заданием.

### **Развить умения:**

- 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 в соответствии с техническим заданием;

- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

- проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления.

- 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 в соответствии с техническим заданием.

- использовать методологию основные понятия системного анализа и теории управления для решения прикладных проектно-конструкторских задач.

### **Приобрести навыки:**

- подготовки публикаций по результатам исследований и разработок;

- производства расчетов 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 в соответствии с техническим заданием;

- проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления;

- производства расчетов 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 в соответствии с техническим заданием.

- принятия научно-обоснованных решений на основе математики, информатики, экологии, методов системного анализа и теории управления, теории знаний, осуществления постановки и выполнения экспериментов по проверке корректности и эффективности.

### 1.6 Календарный учебный график

Условные обозначения:

Теоретическое обучение	час
Итоговая аттестация	ИА

Форма обучения	Дни недели/ауд.час												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
очная	-	2	8	8	8	8	-	-	6	8	8	6	2
													ИА

### 1.7 Учебный план:

№	Наименование дисциплин (модуля)	Всего часов	В том числе					
			Лекции	Практические занятия (семинары)	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа	Выездные мастер-классы	Итоговая аттестация
1	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	2	2	-	-	-	-	-
2	Модуль 1. Управление технологическими процессами.	12	4	8	-	-	-	-
3	Модуль 2. Проектирование систем управления технологическими процессами	18	8	10	-	-	-	-
4	Модуль 3. Моделирование систем управления технологическими процессами	16	6	10	-	-	-	-
5	Модуль 4. Компьютерные технологии организации управления технологическими процессами	14	4	10	-	-	-	-
6	Итоговая аттестация	6	-	-	-	4	-	2
	Всего	68	24	38	-	4	-	2

### 1.8 Объем программы и виды учебной работы:

Вид учебной работы	Часы
Лекционные занятия	24
Практические занятия	38
Лабораторные занятия	-
Выездные мастер-классы	-
Итоговая аттестация	2
<b>Всего очных занятий</b>	<b>64</b>
Самостоятельная работа, включая подготовку к итоговой аттестации	4
<b>Общий объем программы</b>	<b>68</b>

## 2 Содержание обучения:

### 2.1 Содержание обучения по программе:

№	Наименование разделов профессионального модуля, тем	Содержание учебного материала	Объем часов
1	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	- история развития теории автоматического управления; - основы управления технологическими процессами; - актуальность разработки систем управления технологическими процессами; - методы разработки систем управления технологическими процессами.	2
2	Модуль 1. Управление технологическими процессами	- основные понятия и определения автоматизации, информатизации и теории автоматического управления; - методы управления технологическими процессами; - классификация систем управления технологическим процессом; - системы автоматического контроля, системы автоматической сигнализации, системы.	12
3	Модуль 2. Проектирование систем управления технологическими процессами	- основные принципы построения АСУ ТП; - функции и структуры АСУ ТП; - классификация АСУ ТП; - примеры использования алгоритмов контроля и управления в промышленных АСУ ТП; - технические средства подсистем централизованного контроля; - разработка программного обеспечения АСУ ТП.	18
4	Модуль 3. Моделирование систем управления технологическими процессами	- классификация методов моделирования ОРП; - передаточные функции объектов с распределенными параметрами; - решение задач моделирования систем с распределенными параметрами; - частотный анализ объектов с распределёнными параметрами с помощью обычных и расширенных частотных характеристик; распределенный высокоточный регулятор.	16
5	Модуль 4. Компьютерные технологии организации управления в технических системах	- стандартизированная система приборов и средств автоматизации; - технические средства получения информации о состоянии процесса исполнительные элементы автоматики; - технические средства автоматизации на основе микропроцессорных систем; - применение методов теории автоматов в микропроцессорных системах; - технические средства для отображения процессов в системах автоматизации и управления.	14
6	Итоговая аттестация		6
	<b>Всего</b>		<b>68</b>

## 2.2 Рабочие программы дисциплин (модулей) – представлены в Приложении 1.

### 2.3 Формы аттестаций по программе:

Для оценки качества усвоения знаний, умений и опыта деятельности предусмотрены текущий и итоговый виды контроля.

Текущий контроль успеваемости осуществляется на основе письменного опроса, который содержит контрольные вопросы по каждому изучаемому модулю и должны быть сданы обучающимися в ходе учебного периода.

Форма итоговой аттестации по программе – зачет.

К зачету допускаются только те слушатели, которые успешно сдали все промежуточные аттестации по изученным модулям.

### 2.4 Оценочные материалы:

**Примерный перечень вопросов для подготовки к промежуточным аттестациям и зачету**

#### Модуль 1. «Управление технологическими процессами»

1. Какие существуют основные формы представления объектов?
2. Какие существуют подходы формирования пространственной формы?
3. Как описать распределенные объекты дифференциальными уравнениями?
4. Что такое математическая модель тепловых полей многослойной пластины?
5. Как описать распределенные объекты на основе переходных функций?
6. Что такое импульсные и переходные функции?
7. Что такое модальное представление распределенных объектов?
8. Как описать реакции объекта на каждую составляющую ряда?
9. Что представляет собой совокупность передаточных функций?
10. Использование чего, при моделировании, позволяет снять ограничение на шаг интегрирования по времени?
11. Как представляются объекты в виде ряда Фурье?
12. Что такое пространственные координаты?
13. Что представляют граничные условия и входное воздействие?
14. Что такое фазовые переменные?
15. Что называют комплексным передаточным коэффициентом объекта для переменной?
16. Что такое импульсные и переходные функции?
17. Что называют комплексным передаточным коэффициентом для процесса распространения тепла?
18. Каков принцип суперпозиции?
19. Как раскрыть уравнение для определения неизвестной функции?
20. Перечислите функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка?
21. Каково достаточное условие устойчивости распределенных систем?
22. Что есть замкнутая распределенная система со скалярной функцией?
23. Какие существуют независимые контуры?
24. Что такое аналитические функции?
25. Как описать свободное движение в контуре?
26. Перечислите контуры системы управления.
27. Приведите доказательство устойчивости системы с распределенными параметрами. Что такое отрицательные действительные части?
28. Проанализируйте устойчивости по дисперсионным соотношениям.

29. Каковы особенности применения критерия Найквиста к пространственно-инвариантным системам?
30. Что такое зависимость процессов регулирования?
31. Каковы составляющие системы регулирования? Их свойства?
32. Что представляет собой пространственно-усилительное звено?
33. Что представляет собой пространственно-дифференцирующее звено?
34. Что представляет собой пространственно-форсирующее звено?
35. Что представляет собой пространственно-интегрирующее звено?
36. Что представляет собой пространственно-изодромное звено?
37. Перечислите отрицательные действительные части.
38. Что есть техническая реализация распределенных звеньев?
39. Что такое распределенный высокоточный регулятор?
40. Что такое пространственно-усилительное звено?
41. Представьте систему уравнений в матричном виде.
42. Каковы пространственные звенья со специфическими свойствами?
43. Что такое пространственно-волновое звено?
44. Как происходит описание математической модели объекта волновым уравнением?
45. Где используются регуляторы прямого действия?
46. Как обеспечить отвод тепловой энергии?
47. Чем служит блок-насос?
48. Каковы изменения температурного поля?
49. Как устроены конструкции регуляторов прямого действия?

## **Модуль 2. «Проектирование систем управления технологическими процессами»**

1. Какие существуют свойства распределенных блоков?
2. Приведите доказательство возможности преобразования сигнала.
3. Каковы коэффициенты блока рассмотренной структуры?
4. Как выглядит структурная схема распределенного блока?
5. Что такое определитель Вандермонда?
6. Постройте график реализации статического коэффициента усиления.
7. Что представляет собой блок с вычисленными параметрами?
8. Перечислите известные направления решения данной проблемы?
9. Что такое аналитическое конструирование оптимальных регуляторов?
10. Что представляют собой однородные граничные условия?
11. Перечислите заданные весовые функции?
12. Как определяется статическая точность системы?
13. Определите формулу статического коэффициента передачи.
14. Что такое частотный метод синтеза регуляторов?
15. Опишите процедуру синтеза.
16. Вычислите запасы устойчивости по фазе.
17. Что такое графическая интерпретация критерия Найквиста?
18. Перечислите общие замечания к синтезу систем.
19. Что такое передаточная матрица разомкнутой системы?
20. Перечислите свойства пространственной инвариантности.
21. Как происходит формирование структуры передаточной матрицы регулятора?
22. Как представить входное воздействие в виде ряда Фурье?
23. Что такое вид передаточной матрицы разомкнутой системы?

24. Опишите матрицу комплексных передаточных коэффициентов разомкнутой системы.
25. Что такое синтез распределенных систем управления с векторным воздействием?
26. Что позволяет синтезировать распределенный регулятор?
27. Определите дискретную форму записи условия пространственной инвариантности?
28. Что представляет собой синтез многомерных систем управления?
29. Что такое синтез регулятора?
30. Как определить запасы устойчивости?
31. Как происходит моделирование работы замкнутой системы?
32. Какие существуют замечания к синтезу регуляторов многомерных систем?
33. Что такое период упреждения?
34. Как оценивается точность прогноза?
35. Как учитывается в прогнозной модели погрешность в оценке ее параметров?
36. Что такое период упреждения, как он рассчитывается?
37. Что такое ошибка прогноза?
38. В чем суть прогнозной математической модели динамики замещения?
39. Какие методы экспертного оценивания вы знаете?

### **Модуль 3. «Моделирование систем управления технологическими процессами»**

1. Что характеризует детерминированная компонента в уравнении тренда?
2. Что отражает стохастическая компонента в уравнении тренда?
3. В чем состоит задача прогноза?
4. Что является первым этапом экстраполяции тренда?
5. В чем состоит сущность метода наименьших квадратов?
6. Какие функции чаще всего используются в качестве модели тренда в практических исследованиях?
7. Что характеризует начальный коэффициент в уравнении линейного тренда?
8. Что понимают под точностью прогноза?
9. Что понимают под достоверностью прогноза?
10. Какие источники погрешности при построении тренда вы знаете?
11. Что такое доверительный интервал?
12. Зачем в формулу вычисления доверительных границ интервала вводят коэффициент-значение  $t$ -статистики Стьюдента?
13. Какие источники неопределенности необходимо учитывать при определении средней квадратической ошибки прогноза, основанного на линейной модели?
14. Что чаще всего принимается в качестве меры рассеяния наблюдений вокруг линии регрессии?
15. Как происходит оценка дисперсии прогноза?
16. Как ведет себя доверительный интервал при увеличении продолжительности наблюдения?
17. Как меняется доверительный интервал при увеличении периода упреждения прогноза?
18. Какие линеаризующие преобразования вы знаете?
19. Какой вид имеет общее уравнение линейной прогнозной модели?
20. Какой вид имеет общее уравнение экспоненциальной прогнозной модели?
21. Какой вид имеет уравнение гиперболической прогнозной модели 1-го типа?
22. Какой вид имеет уравнение гиперболической прогнозной модели 2-го типа?

23. Какой вид имеет общее уравнение логарифмической прогнозной модели?
24. Какой вид имеет уравнение обратнологарифмической прогнозной модели?
25. Какой вид имеет общее уравнение  $s$ -образной прогнозной модели?
26. Какие кривые обладают точкой перегиба и наиболее точно описывают процессы полного цикла?
27. Каким способом можно получить из модифицированной экспоненты кривые Гомперца и логистические кривые?
28. Сколькими параметрами задана модифицированная экспонента?
29. С помощью какого критерия можно оценить качество прогнозной модели?
30. Что характеризует коэффициент детерминации?
31. Какой критерий используется для проверки значимости уравнения регрессии?
32. Что понимается под автокорреляцией ошибок?
33. Как осуществляется проверка прогнозной модели на автокорреляцию ошибок?
34. С помощью какого критерия проверяется наличие корреляции в последовательном ряду значений?
35. В чем суть статистической экстраполяции?
36. Что такое метод многомерной линейной экстраполяции?
37. Какой метод используется для восстановления неизвестного обобщенного показателя прогнозируемой альтернативы объекта в условиях малого числа наблюдений?
38. Как найти оптимальную выходную характеристику системы для новой ситуации  $x_4$ , если известны ретроспективные ситуации  $x_1, x_2, x_3$ , для которых определены выходные характеристики системы?
39. Как происходит минимизация функции близости?
40. В чем суть метода экстраполяции сглаживания?
41. Что такое интервал сглаживания?
42. Как происходит расчет скользящей средней при большом числе уровней?
43. Как выглядит общая запись в рекуррентной форме экспоненциальной средней порядка  $k$ ?
44. Как определяются параметры прогнозной модели методом экспоненциального сглаживания?
45. Какова последовательность вычисления прогнозных значений?
46. Как выбирается начальное значение сглаживаемой функции?
47. Что такое матрица прецедентов?
48. От чего зависит точность прогноза?
49. Каким образом строится модель, характеризующая зависимость средней ошибки прогноза от двух параметров (периода предыстории и прогнозируемого периода)?
50. Как осуществляется ретроспективный прогноз?

#### **Модуль 4. «Компьютерные технологии организации управления в технических системах»**

1. Типовая структура АСУ ТП
2. Функции устройств связи с объектом
3. Первичные измерительные преобразователи
4. Исполнительные устройства, исполнительные механизмы
5. Передача измерительных сигналов. Полоса пропускания и шум
6. Статические характеристики первичных преобразователей, нелинейность.
7. Динамические характеристики первичных преобразователей
8. Ввод аналоговых сигналов в компьютер
9. Дискретизация аналоговых сигналов
10. Основные этапы обработки измерительной информации в компьютере (ПЛК)

11. Цифровая фильтрация
12. Масштабирование и линеаризация сигнала АЦП.
13. Проверка достоверности исходных данных и аварийная сигнализация
14. Открытая модульная архитектура контроллеров
15. Программируемые логические контроллеры. Аппаратная архитектура
16. Цикл контроллера
17. Процедура ввода-вывода контроллеров семейства Quantum фирмы SchneiderElectric
18. Технологии VME и PCI
19. Основные характеристики модулей центральных процессоров
20. Основные характеристики модулей аналогового ввода-вывода
21. Основные характеристики модулей дискретного ввода-вывода
22. Промышленные сети. «Закрытые» и «открытые» стандарты.
23. Модель взаимодействия открытых систем (OSI-модель). Применение модели

#### ВОС в промышленных сетях

24. Передача данных (интерфейсы RS-232C, RS-422, RS-485)
25. Методы доступа к шине
26. Основные критерии выбора стандарта промышленной сети.
27. Протокол MODBUS
28. Протокол CANBUS
29. Протокол HART
30. Протокол ASI
31. Протокол PROFIBUS
32. Электрические измерения неэлектрических величин
33. Мостовая измерительная схема постоянного тока
34. Варианты подключения датчиков к неуравновешенному мосту
35. Мостовая схема переменного тока
36. Дифференциальные измерительные схемы
37. Компенсационные измерительные схемы
38. Первичные преобразователи с неэлектрическим выходным сигналом для измерения давлений, расходов, температуры.
39. Потенциометрические датчики. Принцип действия, конструкция, характеристики линейного датчика
40. Реверсивные и функциональные потенциометрические датчики
41. Тензометрические датчики. Принцип действия, устройство проволочных тензодатчиков.
42. Фольговые и пленочные тензодатчики. Схемы включения тензодатчиков
43. Индуктивные датчики.
44. Дифференциальные индуктивные датчики.
45. Плунжерные датчики
46. Трансформаторные датчики
47. Дифференциальные трансформаторные датчики
48. Магнитоупругие датчики
49. Металлические термометры сопротивления
50. Полупроводниковые термометры сопротивления
51. Применение терморезисторов. Схемы включения терморезисторов
52. Термопары. Способы использования

## 2.4.1 Критерии оценивания

### Критерии оценок промежуточной аттестации

Оценка	Описание
<b>Зачтено</b>	Посещение более 50 % лекционных и лабораторных занятий; обучающийся твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос; все предусмотренные программой обучения задания выполнены, качество их выполнения достаточно высокое; в течение курса выполнил работу.
<b>Не зачтено</b>	Посещение менее 50 % лекционных и лабораторных занятий; обучающийся не знает значительной части материала, допускает существенные ошибки в ответах на вопросы; большинство предусмотренных программой обучения заданий не выполнено, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному.

**Критерии оценок итоговой аттестации:** примерная шкала оценивания знаний по выполнению заданий зачета:

Оценка	
Не зачтено	Зачтено
Посещение менее 50 % лекционных и практических занятий	Посещение не менее 50 % лекционных и практических занятий
Обучающийся не знает значительной части материала, допускает существенные ошибки в ответах на вопросы	Обучающийся хорошо знает материал, грамотно и по существу излагает его, допуская некоторые неточности в ответе на вопрос.
Не умеет находить решения большинства предусмотренных программой обучения заданий	Уверенно находит решения предусмотренных программой обучения заданий
Большинство предусмотренных программой обучения заданий не выполнено	Предусмотренные программой обучения задания успешно выполнены

**2.5. Учебно-методические материалы (в том числе конспекты лекций) – представлены в Приложении 2.**

#### **2.5. Вид документа, подтверждающий прохождение обучения:**

После успешного окончания обучения выдается сертификат о прохождении Международной специальной краткосрочной программы под эгидой Международного центра ЮНЕСКО: «Разработка систем управления технологическими процессами».

### **3 Организационно-педагогические условия реализации программы:**

#### **3.1 Материально-технические условия реализации программы:**

Для реализации программы используются 2 аудитории кафедры системного анализа и управления, оснащённые мультимедийными проекторами, компьютерами с возможностью доступа к сети «Интернет».

### 3.2. Кадровое обеспечение образовательного процесса по программе:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Образование (вуз, год окончания, специальность)	Должность, ученая степень, звание. Стаж работы в данной или аналогичной области	Перечень основных научных и учебно- методических публикаций
Руководитель программы				
1	Мартиросян Александр Витальевич	2013 ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» специалист, диплом ОК № 64157 «Прикладная информатика в экономике» 2015 ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» магистр, диплом № 106104 0000158 «Системный анализ и управление», канд. техн. наук (КНД № 042913)	ассистент кафедры системного анализа и управления, Санкт - Петербургский горный университет, канд. техн. наук, стаж 5 лет	Автор 39 научных работ, в том числе 7 свидетельств на программу для ЭВМ.
Профессорско-преподавательский состав программы				
1	Афанасьева Ольга Владимировна	Канд. техн. наук (диплом КТ № 133742), 2004; доцент (аттестат ДЦ № 038383), 2005;	доцент кафедры системного анализа и управления, Санкт - Петербургский горный университет, канд. техн. наук, Почётный работник высшего профессионального образования, более 20 лет	Автор более 120 научных работ, в том числе 3 монографий, 20 патентов и свидетельств на программу для ЭВМ.
2	Мартиросян Александр Витальевич	Канд. техн. наук (диплом КНД № 042913), 2017	ассистент кафедры системного анализа и управления, Санкт - Петербургский горный университет, канд. техн. наук, стаж 5 лет	Автор более 30 научных работ, в том числе 7 свидетельств на программу для ЭВМ.

Приложение 1  
к образовательной программе –  
«Международная специальная краткосрочная  
Программа под эгидой Международного центра ЮНЕСКО  
«Разработка систем управления технологическими процессами»

**Рабочая программа модуля  
«Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами»**

**1. Цели и задачи модуля**

**Цель модуля** — формирование целостного мировоззрения и развитие системного стиля мышления.

**Основные задачи:**

- формирование научно-теоретического уровня мышления;
- приобретение необходимых знаний, умений и навыков в использовании категориального аппарата;

**2. Планируемые результаты обучения**

Процесс изучения модуля «Управление технологическими процессами» направлен на формирование следующих компетенций:

<b>Формируемые профессиональные компетенции</b>	<b>Основные показатели освоения модуля</b>
Способность представлять современную научную картину мира на основе знаний основных положений, законов и методов естественных наук и математики	<b>Знать</b> методы математики, системного анализа, теории управления, теории знаний, теории и технологии программирования, а также методы гуманитарных, экономических и социальных наук применительно исследованию сложных систем
	<b>Уметь</b> использовать методологию основные понятия системного анализа и теории управления для решения прикладных проектно-конструкторских задач.
	<b>Владеть</b> навыками принятия научно-обоснованных решений на основе математики, информатики, экологии, методов системного анализа и теории управления, теории знаний, осуществления постановки и выполнения экспериментов по проверке корректности и эффективности.

### 3. Структура и содержание модуля

#### 3.1 Разделы модуля и виды занятий

№ п/п	Наименование дисциплины (модуля)/наименование тем дисциплины (модуля)	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			лекц.	практич.	самост.	
1	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	2	2	–	–	–

#### 3.2. Содержание раздела модуля

№ темы	Наименование тем	Содержание учебного материала	Объем часов
1.	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	В рамках данной темы рассмотрены следующие процессы и понятия: - теория автоматического управления; - системы управление; - история развития систем управления; - технологические процессы.	2

#### 4. Перечень лекционных занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.	лекционное занятие	2

#### 5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

**Введение. Общие положения разработки систем управления технологическими процессами.**

1. Моделирование систем и процессов: учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова [и др.] ; под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 450 с.

Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/viewer/E7D370B9-3C64-4A0F-AF1B-F6BD0EEEBCD0#page/1>

2. Моделирование систем [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Горная книга, 2006. — 295 с.

Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/3511/#1>

3. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов и др. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 890 с.

Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=515227>

4. Теория систем и системный анализ : учебник и практикум для академического бакалавриата / М. Б. Алексеева, П. П. Ветренко. — М. : Издательство Юрайт, 2017. - 304 с.

Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/viewer/B791EB3D-7CD9-48A7-B7DD-BEB4670DB29E#page/1>

5. Экономико-математические методы и прикладные модели : учебник для бакалавриата и магистратуры / А. Н. Гармаш, И. В. Орлова, В. В. Федосеев. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 328 с.

## 6. Материально-техническое обеспечение

### Материально-техническое оснащение аудиторий:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы.

### Рабочая программа модуля «Управление технологическими процессами»

#### 1. Цели и задачи модуля

**Цель модуля** — получение представлений о современных средствах автоматизации и управления при решении инженерных и управленческих задач, о разработке современных систем управления различными промышленными механизмами, агрегатами и технологическими комплексами для различных отраслей промышленности.

#### Основные задачи:

- получение дополнительных знаний о принципах проектирования современных промышленных механизмов, агрегатов и технологических комплексов;
- получение дополнительных знаний о методах, приемах, способах выбора средств автоматизации для промышленных механизмов, агрегатов и технологических комплексов;
- получение дополнительных знаний о достоинствах и недостатках различных средств автоматизации.

#### 2. Планируемые результаты обучения

Процесс изучения модуля «Управление технологическими процессами» направлен на формирование следующих компетенций:

Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
Готовность участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок	<b>Знать</b> принципы составления аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок;
	<b>Уметь</b> составлять аналитические обзоры и научно-технические отчеты по результатам выполненной работы;
	<b>Владеть</b> навыками подготовки публикаций по результатам исследований и разработок.

### 3. Структура и содержание модуля

#### 3.1 Разделы модуля и виды занятий

№ п/п	Наименование дисциплины (модуля)/наименование тем дисциплины (модуля)	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			лекц.	практич	самост	
<b>1</b>	<b>Модуль 1. Управление технологическими процессами</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>–</b>	<b>текущий</b>
1.1.	Классификация современных технологических процессов. Основы методов организации управления технологическими процессами.	2	2	–	–	–
1.2.	Определение системы. Классификация системного анализа систем. Свойства систем. Виды систем и их особенности.	2	2	–	–	–
1.3.	Декомпозиция систем. Анализ систем.	8		8		–

#### 3.2 Перечень лекционных занятий

№ тем	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Классификация современных технологических процессов. Основы методов организации управления технологическими процессами.	лекционное занятие	2
2.	Определение системы. Классификация системного анализа систем. Свойства систем. Виды систем и их особенности.	лекционное занятие	2

#### 3.3. Перечень практических занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Декомпозиция систем. Анализ систем.	практическое занятие	8

### 4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости

50. Какие существуют основные формы представления объектов?
51. Какие существуют подходы формирования пространственной формы?
52. Как описать распределенные объекты дифференциальными уравнениями?
53. Что такое математическая модель тепловых полей многослойной пластины?
54. Как описать распределенные объекты на основе переходных функций?
55. Что такое импульсные и переходные функции?
56. Что такое модальное представление распределенных объектов?
57. Как описать реакции объекта на каждую составляющую ряда?
58. Что представляет собой совокупность передаточных функций?

59. Использование чего, при моделировании, позволяет снять ограничение на шаг интегрирования по времени?
60. Как представляются объекты в виде ряда Фурье?
61. Что такое пространственные координаты?
62. Что представляют граничные условия и входное воздействие?
63. Что такое фазовые переменные?
64. Что называют комплексным передаточным коэффициентом объекта для переменной?
65. Что такое импульсные и переходные функции?
66. Что называют комплексным передаточным коэффициентом для процесса распространения тепла?
67. Каков принцип суперпозиции?
68. Как раскрыть уравнение для определения неизвестной функции?
69. Перечислите функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка?
70. Каково достаточное условие устойчивости распределенных систем?
71. Что есть замкнутая распределенная система со скалярной функцией?
72. Какие существуют независимые контуры?
73. Что такое аналитические функции?
74. Как описать свободное движение в контуре?
75. Перечислите контуры системы управления.
76. Приведите доказательство устойчивости системы с распределенными параметрами. Что такое отрицательные действительные части?
77. Проанализируйте устойчивости по дисперсионным соотношениям.
78. Каковы особенности применения критерия Найквиста к пространственно-инвариантным системам?
79. Что такое зависимость процессов регулирования?
80. Каковы составляющие системы регулирования? Их свойства?
81. Что представляет собой пространственно-усилительное звено?
82. Что представляет собой пространственно-дифференцирующее звено?
83. Что представляет собой пространственно-форсирующее звено?
84. Что представляет собой пространственно-интегрирующее звено?
85. Что представляет собой пространственно-изодромное звено?
86. Перечислите отрицательные действительные части.
87. Что есть техническая реализация распределенных звеньев?
88. Что такое распределенный высокоточный регулятор?
89. Что такое пространственно-усилительное звено?
90. Представьте систему уравнений в матричном виде.
91. Каковы пространственные звенья со специфическими свойствами?
92. Что такое пространственно-волновое звено?
93. Как происходит описание математической модели объекта волновым уравнением?
94. Где используются регуляторы прямого действия?
95. Как обеспечить отвод тепловой энергии?
96. Чем служит блок-насос?
97. Каковы изменения температурного поля?
98. Как устроены конструкции регуляторов прямого действия?

## 5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Мирянова В. Н. Параметрическая устойчивость и качество систем управления тепловыми объектами с распределенными параметрами: Монография/Мирянова В.Н. - М.:

Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 166 с.: 60x90 1/16. - (Научная книга) (Обложка) ISBN 978-5-9558-0492-7

2. Режим доступа – <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=544682>
3. Панкратов В. В. Избранные разделы современной теории автоматического управления/Панкратов В.В., Нос О.В., Зима Е.А. - Новосиb.: НГТУ, 2011. - 223 с.: ISBN 978-5-7782-1810-9 Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=548433>
4. Глазырин Г. В. Теория автоматического регулирования / Глазырин Г.В. - Новосиb.: НГТУ, 2014. - 168 с.: ISBN 978-5-7782-2473-5 Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=558731>
5. Тихомирова А. Н. Теория принятия решений: Электронная публикация / Тихомирова А.Н., Матросова Е.В. - М.:КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 68 с.: 60x90 1/16 ISBN 978-5-906818-18-8 Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=767634>
6. Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления / Жмудь В.А. - Новосиb.: НГТУ, 2012. - 335 с.: ISBN 978-5-7782-2162-8 Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=558840>
7. Пантелеев А. В. Теория управления в примерах и задачах: учебное пособие, 2-е изд., стереотип.: учебное пособие, - 2-е изд. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 584 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-16-011862-8 Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=542627>
8. Европейская цифровая библиотека Europeana: <http://www.europeana.eu/portal>
9. Информационно-издательский центр по геологии и недропользованию Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации - ООО "ГЕОИНФОРММАРК" - <http://www.geoinform.ru/>
10. Информационно-аналитический центр «Минерал» - <http://www.mineral.ru/>
11. КонсультантПлюс: справочно - поисковая система [Электронный ресурс]. - [www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru/)
12. Мировая цифровая библиотека: <http://wdl.org/ru>
13. Научная электронная библиотека «Scopus» <https://www.scopus.com>
14. Научная электронная библиотека ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>
15. Научная электронная библиотека «eLIBRARY»: <https://elibrary.ru/https://e.lanbook.com/books>

## **6. Материально-техническое обеспечение**

### **Материально-техническое оснащение аудиторий:**

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа и практических оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы. Для выполнения лабораторных заданий необходимо иметь файлы тестовых заданий и задач, предусмотренных к решению. Файлы выдаются на флеш-носителе на первом ознакомительном занятии. В рамках образовательной программы используется следующее программное обеспечение: MathCAD, Matlab.

## **Рабочая программа модуля**

### **«Проектирование систем управления технологическими процессами»**

#### **1. Цели и задачи модуля**

**Цель модуля** – приобретение теоретических и практических знаний в области проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами.

### Основные задачи:

- получение студентом необходимого объема знаний в области проектирования автоматизированных систем управления
- получение практических навыков применения знаний для решения практических задач в области автоматизированных систем управления.

## 2. Планируемые результаты обучения

Процесс изучения модуля «Проектирование систем управления технологическими процессами» направлен на формирование следующих компетенций:

Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
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 в соответствии с техническим заданием	<b>Знать</b> 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 в соответствии с техническим заданием;
	<b>Уметь</b> 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 в соответствии с техническим заданием;
	<b>Владеть навыками</b> производства расчетов 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 в соответствии с техническим заданием

## 3. Структура модуля

### 3.1 Разделы модуля и виды занятий

№ п/п	Наименование модуля	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			лекц.	практич.	самост.	
1	<b>Модуль 2. Проектирование систем управления технологическими процессами</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	–	–
1.1	Формирование требований к системе управления. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимального распределения ресурсов.	2	2	–	–	–

1.2	Определение оптимального набора параметров объекта управления	2	2	-	-	-
1.3	Экспериментальное определение параметров объекта	2	2	-	-	-
1.4	Разработка структурных схем технологических процессов	2	2	-	-	-
1.6	Прикладные аспекты оптимального распределения ресурсов.	4	-	4	-	-
1.7	Определение вида и способа представления объекта управления	2	-	2	-	-
1.8	Особенности применения моделей массового обслуживания», работа с программой для ЭВМ № 2014662876 «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов», правообладатель Санкт-Петербургской горный университет.	2	-	2	-	-
1.9	Прикладные задачи системного моделирования, работа с программой для ЭВМ №2016617578 «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов», Правообладатель Санкт-Петербургской горный университет.	2	-	2	-	-

### 3.2 Перечень лекционных занятий

№ темы	Наименование занятия	Вид занятия	Кол-во час.
1	Формирование требований к системе управления. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимального распределения ресурсов.	Лекционное занятие	2
2	Определение оптимального набора параметров объекта управления	Лекционное занятие	2
3	Экспериментальное определение параметров объекта	Лекционное занятие	2
4	Разработка структурных схем технологических процессов	Лекционное занятие	2

### 3.4 Перечень практических занятий

№ темы	Наименование занятия	Вид занятия	Кол-во час.
6	Прикладные аспекты оптимального распределения ресурсов.	Практическое занятие	4
7	Определение вида и способа представления объекта управления	Практическое занятие	2
8	Особенности применения моделей массового обслуживания», работа с программой для ЭВМ № 2014662876 «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов», правообладатель Санкт-Петербургской горный университет.	Практическое занятие	2
9	Прикладные задачи системного моделирования, работа с программой для ЭВМ №2016617578 «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов», Правообладатель Санкт-Петербургской горный университет.	Практическое занятие	2

### 4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости

#### Вопросы для текущего контроля успеваемости:

1. Какие существуют свойства распределенных блоков?
2. Приведите доказательство возможности преобразования сигнала.
3. Каковы коэффициенты блока рассмотренной структуры?
4. Как выглядит структурная схема распределенного блока?
5. Что такое определитель Вандермонда?
6. Постройте график реализации статического коэффициента усиления.
7. Что представляет собой блок с вычисленными параметрами?
8. Перечислите известные направления решения данной проблемы?
9. Что такое аналитическое конструирование оптимальных регуляторов?
10. Что представляют собой однородные граничные условия?
11. Перечислите заданные весовые функции?
12. Как определяется статическая точность системы?
13. Определите формулу статического коэффициента передачи.
14. Что такое частотный метод синтеза регуляторов?
15. Опишите процедуру синтеза.
16. Вычислите запасы устойчивости по фазе.
17. Что такое графическая интерпретация критерия Найквиста?
18. Перечислите общие замечания к синтезу систем.
19. Что такое передаточная матрица разомкнутой системы?
20. Перечислите свойства пространственной инвариантности.
21. Как происходит формирование структуры передаточной матрицы регулятора?
22. Как представить входное воздействие в виде ряда Фурье?
23. Что такое вид передаточной матрицы разомкнутой системы?
24. Опишите матрицу комплексных передаточных коэффициентов разомкнутой системы.
25. Что такое синтез распределенных систем управления с векторным воздействием?
26. Что позволяет синтезировать распределенный регулятор?

27. Определите дискретную форму записи условия пространственной инвариантности?
28. Что представляет собой синтез многомерных систем управления?
29. Что такое синтез регулятора?
30. Как определить запасы устойчивости?
31. Как происходит моделирование работы замкнутой системы?
32. Какие существуют замечания к синтезу регуляторов многомерных систем?
33. Что такое период упреждения?
34. Как оценивается точность прогноза?
35. Как учитывается в прогнозной модели погрешность в оценке ее параметров?
36. Что такое период упреждения, как он рассчитывается?
37. Что такое ошибка прогноза?
38. В чем суть прогнозной математической модели динамики замещения?
39. Какие методы экспертного оценивания вы знаете?

## 5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Беккер В. Ф. Технические средства автоматизации. Интерфейсные устройства и микропроцессорные средства: Учебное пособие/Беккер В. Ф., 2-е изд. - М.: РИОР, ИЦ РИОР, 2015. - 140 с.: 60x88 1/16 (Обложка) ISBN 978-5-369-01198-0

2. Шишов О. В. Технические средства автоматизации и управления: Учебное пособие / Шишов О. В. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 396 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат) (Переплёт) ISBN 978-5-16-010325-9

3. Гагарина Л. Г. Технические средства информатизации: учеб. пособие / Л.Г. Гагарина. - М.: ИД ФОРУМ, 2010. - 256 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Профессиональное образование). (переплет) ISBN 978-5-8199-0409-1

4. Зверева В. П. Назаров А. В. Технические средства информатизации: Учебник / Зверева В.П., Назаров А.В. - М.:КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 256 с.: 60x90 1/16. - (Среднее профессиональное образование) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-906818-88-1

5. Тимохин А. Н. Моделирование систем управления с применением Matlab: Учебное пособие / А.Н. Тимохин, Ю.Д. Румянцев. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 256 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=590240>

6. Балашов А. П. Основы теории управления: Учебное пособие/А.П.Балашов - М.: Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 280 с.: 60x90 1/16 (Переплёт) ISBN 978-5-9558-0410-1

## 6. Материально-техническое обеспечение

### Материально-техническое оснащение аудиторий:

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа и практических оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы. Для выполнения лабораторных заданий необходимо иметь файлы тестовых заданий и задач, предусмотренных к решению. Файлы выдаются на флеш-носителе на первом ознакомительном занятии. В рамках образовательной программы используется следующее программное обеспечение: MathCAD, Matlab.

**Рабочая программа модуля  
«Моделирование систем управления технологическими процессами»**

**1. Цели и задачи модуля**

**Цель модуля** — подготовка высококвалифицированного специалиста, глубоко знающего основы теории автоматического управления и умеющего выполнять исследовательские и расчетные работы по исследованию и синтезу систем с распределенными параметрами.

**Основная задача:**

- усвоение основных положений теоретических основ автоматизированного управления.

**2. Планируемые результаты обучения**

Процесс изучения модуля «Моделирование систем управления технологическими процессами» направлен на формирование следующих компетенций:

<b>Формируемые профессиональные компетенции</b>	<b>Основные показатели освоения модуля</b>
Способность проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления	<b>Знать</b> методы моделирования, анализа и технологии синтеза процессов и систем для решения прикладных проектно-конструкторских задач;
	<b>Уметь</b> применять методы математики, физики, химии, системного анализа, теории управления, теории знаний, теории и технологии программирования, а также методов гуманитарных, экономических социальных наук;
	<b>Владеть</b> навыками применения методов системного анализа, технологии синтеза и управления для решения прикладных проектно-конструкторских задач.

**3 Структура модуля**

**3.1 Разделы модуля и виды занятий**

№ п/п	Наименование дисциплины (модуля)/наименование тем дисциплины (модуля)	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			лекц.	практич	самост.	
<b>1</b>	<b>Модуль 3. Моделирование систем управления технологическими процессами</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>-</b>	<b>текущий</b>
1.1	Основные понятия и принципы разработки математической модели технологического процесса. Основные виды математических моделей систем и способов их взаимодействия.	2	2	-	-	-

1.2	Способы преобразования и математического описания структурных схем. Методы моделирования входного воздействия распределенного по одной пространственной координате	2	2	-	-	-
1.3	Методы моделирования входного воздействия распределенного по двум пространственным координатам Методы моделирования двумерного распределенного объекта.	2	2	-	-	-
1.4	Методы моделирования трехмерного распределенного объекта	2	-	2	-	-
1.5	Методы моделирования замкнутой системы управления с пространственно- усилительным звеном.	4	-	4	-	-
1.6	Методы моделирования замкнутой распределенной системы управления с распределенным высокоточным регулятором	4	-	4	-	-

### 3.2 Перечень лекционных занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Основные понятия и принципы разработки математической модели технологического процесса. Основные виды математических моделей систем и способов их взаимодействия.	лекционное занятие	2
2.	Способы преобразования и математического описания структурных схем Методы моделирования входного воздействия распределенного по одной пространственной координате	лекционное занятие	2

3.	Методы моделирования входного воздействия распределенного по двум пространственным координатам Методы моделирования двумерного распределенного объекта.	лекционное занятие	2
----	--	--------------------	---

### 3.3 Перечень практических занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Методы моделирования трехмерного распределенного объекта	практическое занятие	2
2.	Методы моделирования замкнутой системы управления с пространственно- усилительным звеном.	практическое занятие	4
3.	Методы моделирования замкнутой распределенной системы управления с распределенным высокоточным регулятором	практическое занятие	4

#### 4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости

##### Вопросы для текущего контроля успеваемости:

1. Что характеризует детерминированная компонента в уравнении тренда?
2. Что отражает стохастическая компонента в уравнении тренда?
3. В чем состоит задача прогноза?
4. Что является первым этапом экстраполяции тренда?
5. В чем состоит сущность метода наименьших квадратов?
6. Какие функции чаще всего используются в качестве модели тренда в практических исследованиях?
7. Что характеризует начальный коэффициент в уравнении линейного тренда?
8. Что понимают под точностью прогноза?
9. Что понимают под достоверностью прогноза?
10. Какие источники погрешности при построении тренда вы знаете?
11. Что такое доверительный интервал?
12. Зачем в формулу вычисления доверительных границ интервала вводят коэффициент-значение  $t$ -статистики Стьюдента?
13. Какие источники неопределенности необходимо учитывать при определении средней квадратической ошибки прогноза, основанного на линейной модели?
14. Что чаще всего принимается в качестве меры рассеяния наблюдений вокруг линии регрессии?
15. Как происходит оценка дисперсии прогноза?
16. Как ведет себя доверительный интервал при увеличении продолжительности наблюдения?
17. Как меняется доверительный интервал при увеличении периода упреждения прогноза?
18. Какие линеаризующие преобразования вы знаете?
19. Какой вид имеет общее уравнение линейной прогнозной модели?
20. Какой вид имеет общее уравнение экспоненциальной прогнозной модели?
21. Какой вид имеет уравнение гиперболической прогнозной модели 1-го типа?
22. Какой вид имеет уравнение гиперболической прогнозной модели 2-го типа?
23. Какой вид имеет общее уравнение логарифмической прогнозной модели?

24. Какой вид имеет уравнение обратного логарифмической прогнозной модели?
25. Какой вид имеет общее уравнение s-образной прогнозной модели?
26. Какие кривые обладают точкой перегиба и наиболее точно описывают процессы полного цикла?
27. Каким способом можно получить из модифицированной экспоненты кривые Гомперца и логистические кривые?
28. Сколькими параметрами задана модифицированная экспонента?
29. С помощью какого критерия можно оценить качество прогнозной модели?
30. Что характеризует коэффициент детерминации?

### **5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

1. Гагарина Л. Г. Технические средства информатизации: учеб. пособие / Л.Г. Гагарина. - М.: ИД ФОРУМ, 2010. - 256 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Профессиональное образование). (переплет) ISBN 978-5-8199-0409-1
2. Зверева В. П. Назаров А. В. Технические средства информатизации: Учебник / Зверева В.П., Назаров А.В. - М.:КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 256 с.: 60x90 1/16. - (Среднее профессиональное образование) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-906818-88-1
3. Бирюкова Л. Г. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие / Бирюкова Л.Г., Бобрик Г.И., Матвеев В.И., - 2-е изд. - М.:НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 289 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-16-011793-5
4. Тимохин А. Н. Моделирование систем управления с применением Matlab: Учебное пособие / А.Н. Тимохин, Ю.Д. Румянцев. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 256 с.
5. Балашов А. П. Основы теории управления: Учебное пособие/А.П.Балашов - М.: Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 280 с.: 60x90 1/16 (Переплёт) ISBN 978-5-9558-0410-1
6. Европейская цифровая библиотека Europeana: <http://www.europeana.eu/portal>
7. Информационно-издательский центр по геологии и недропользованию Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации - ООО "ГЕОИНФОРММАРК" - <http://www.geoinform.ru/>
8. Информационно-аналитический центр «Минерал» - <http://www.mineral.ru/>
9. Мировая цифровая библиотека: <http://wdl.org/ru>
10. Научная электронная библиотека «Scopus» <https://www.scopus.com>
11. Научная электронная библиотека ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>
12. Научная электронная библиотека «eLIBRARY»: <https://elibrary.ru/>  
<https://e.lanbook.com/books>.
13. Термические константы веществ. Электронная база данных, <http://www.chem.msu.su/cgibin/tkv.pl>
14. Электронно-библиотечная система издательского центра «Лань»
15. Электронная библиотека Российской Государственной Библиотеки (РГБ)

### **6. Материально-техническое обеспечение**

#### **Материально-техническое оснащение аудиторий:**

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа и практических оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы. Для выполнения лабораторных заданий необходимо иметь файлы тестовых заданий и задач, предусмотренных к решению. Файлы выдаются на флеш-носителе на первом ознакомительном занятии. В рамках образовательной программы используется следующее программное обеспечение: MathCAD, Matlab.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)  
«Компьютерные технологии организации управления технологическими процессами»**

**1. Цели и задачи модуля**

**Цель модуля** – приобретение знаний о возможностях проектирования, создания и применения автоматизированных информационно-управляющих систем.

**Основные задачи:**

- изучение основополагающих принципов организации современных информационных компьютерных технологий;
- изучение областей применения информационных компьютерных технологий в электротехнике и электроэнергетике;
- изучение основных положений теоретических основ автоматизированного управления.

**2. Планируемые результаты обучения**

Процесс изучения модуля «Компьютерные технологии организации управления технологическими процессами» направлен на формирование следующих компетенций:

Формируемые профессиональные компетенции	Основные показатели освоения модуля
Способность применять методы системного анализа, технологии синтеза и управления для решения прикладных проектно-конструкторских задач	<b>Знать:</b> методы моделирования, анализа и технологии синтеза процессов и систем для решения прикладных проектно-конструкторских задач;
	<b>Уметь:</b> грамотно применять методы математики, физики, химии, системного анализа, теории управления, теории знаний, теории и технологии программирования, а также методов гуманитарных, экономических и социальных наук;
	<b>Владеть навыками:</b> применения методов системного анализа, технологии синтеза и управления для решения прикладных проектно-конструкторских задач.

**3. Структура модуля**

**3.1 Разделы модуля и виды занятий**

№ п/п	Наименование дисциплины (модуля)/наименование тем дисциплины (модуля)	Всего, час	в том числе			Форма контроля
			лекц.	практич.	самост	
1	<b>Модуль 4. Компьютерные технологии организации управления технологическими процессами</b>	14	4	10	-	текущий

1.1.	Обзор инструментов разработки систем управления технологическими процессами Промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры	2	2	-	-	-
1.2.	Устройства сбора и передачи информации Основные направления развития современных средств автоматизации управления	2	2	-	-	-
1.3.	Методы проведения исследования с MathCad.	4	-	4	-	-
1.4.	Методы проведения исследования с MatLab.	6	-	6	-	-

### 3.2 Перечень лекционных занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Обзор инструментов разработки систем управления технологическими процессами Промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры	лекционное занятие	2
2.	Устройства сбора и передачи информации Основные направления развития современных средств автоматизации управления	лекционное занятие	2

### 3.4 Перечень практических занятий

№ темы	Наименование занятия семинарского типа	Вид занятия	Кол-во час.
1.	Методы проведения исследования с MathCad	практическое занятие	4
2.	Методы проведения исследования с MatLab	практическое занятие	6

### 4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости

#### Вопросы для текущего контроля успеваемости:

1. Типовая структура АСУ ТП
2. Функции устройств связи с объектом
3. Первичные измерительные преобразователи
4. Исполнительные устройства, исполнительные механизмы
5. Передача измерительных сигналов. Полоса пропускания и шум
6. Статические характеристики первичных преобразователей, нелинейность.
7. Динамические характеристики первичных преобразователей
8. Ввод аналоговых сигналов в компьютер

9. Дискретизация аналоговых сигналов
10. Основные этапы обработки измерительной информации в компьютере (ПЛК)
11. Цифровая фильтрация
12. Масштабирование и линеаризация сигнала АЦП.
13. Проверка достоверности исходных данных и аварийная сигнализация
14. Открытая модульная архитектура контроллеров
15. Программируемые логические контроллеры. Аппаратная архитектура
16. Цикл контроллера
17. Процедура ввода-вывода контроллеров семейства Quantum фирмы Schneider Electric
18. Технологии VME и PCI
19. Основные характеристики модулей центральных процессоров
20. Основные характеристики модулей аналогового ввода-вывода
21. Основные характеристики модулей дискретного ввода-вывода
22. Промышленные сети. «Закрытые» и «открытые» стандарты.
23. Модель взаимодействия открытых систем (OSI-модель). Применение модели ВОС в промышленных сетях
24. Передача данных (интерфейсы RS-232C, RS-422, RS-485)
25. Методы доступа к шине

## **5. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

1. Смирнов В.И. Курс высшей математики.– СПб.: БХВ - Петербург, т.т.1,2,3 (ч.1 и 2), 2008. [Электронный ресурс] - [http://www.ph4s.ru/kurs\\_mat.html](http://www.ph4s.ru/kurs_mat.html)
2. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М.: Интеграл-пресс, т.т.1-2, 2005. [Электронный ресурс] - <http://nashol.com/2012040964377/differencialnoe-i-integralnoe-ischisleniya-tom-1-piskunov-n-s-1996.html>
3. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. – СПб: Лань, т.т.1-2, 2006. [Электронный ресурс] - [http://www.ph4s.ru/kurs\\_mat.html](http://www.ph4s.ru/kurs_mat.html)
4. Бронштейн И.Н. Справочник по математике. / Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. М.: Лань, 2010. [Электронный ресурс] - <http://nashol.com/2014100279949/spravochnik-po-matematike-dlya-injenerov-i-uchaschihsya-vtuzov-bronshtein-i-n-semendyaev-k-a-1986.html>
5. Борисов А.М. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.М. Борисов, А.Б. Алексеев, Г.В. Меркурьева. - М.: Радио и связь, 1989.
6. Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 288 с.
7. Завлин П.Н., Васильев А.В., Кноль А.И. Оценка экономической эффективности инновационных проектов (современные подходы). – СПб.: Наука, 1995. – 422 с.
8. Кулагин О.А. Принятие решений в системах организационного управления. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 178с.
9. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. – М.: Наука, 1987. – 144 с.
10. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. М.: Радио и связь, 1981.
11. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. М.: Наука, 1987.

## **6. Материально-техническое обеспечение**

### **Материально-техническое оснащение аудиторий:**

Специализированные аудитории, используемые при проведении занятий лекционного типа и практических оснащены мультимедийными проекторами и комплектом аппаратуры, позволяющей демонстрировать текстовые и графические материалы. Для выполнения лабораторных заданий необходимо иметь файлы тестовых заданий и задач, предусмотренных к решению. Файлы выдаются на флеш-носителе на первом ознакомительном занятии. В рамках образовательной программы используется следующее программное обеспечение: MathCAD, Matlab.

**Приложение 2**  
**к образовательной программе –**  
**«Международная специальная краткосрочная**  
**Программа под эгидой Международного центра ЮНЕСКО**  
**«Разработка систем управления технологическими процессами»**

**Учебно-методические материалы для обеспечения Международной образовательной  
специальной краткосрочной программы под эгидой Международного центра  
ЮНЕСКО**

**Наименование программы: «Разработка систем управления технологическими  
процессами»**

**Санкт-Петербург**  
**2019**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ .....	33
Модуль 1. Управление технологическими процессами.....	38
1.1. Классификация современных технологических процессов .....	38
1.2. Основы методов организации управления технологическими процессами .....	42
1.2. Определение системы. Классификация системного анализа систем .....	46
1.4. Свойства систем. Виды систем и их особенности.....	51
1.5. Декомпозиция систем. Анализ систем .....	56
Модуль 2. Проектирование систем управления технологическими процессами .....	62
2.1. Формирование требований к системе управления .....	62
2.2. Определение оптимального набора параметров объекта управления .....	69
2.3. Экспериментальное определение параметров объекта.....	74
2.4. Разработка структурных схем технологических процессов.....	80
2.5. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимального распределения ресурсов .....	85
2.6. Прикладные аспекты оптимального распределения ресурсов.....	95
2.7. Определение вида и способа представления объекта управления .....	102
2.8. Особенности применения моделей массового обслуживания, работа с программой для ЭВМ № 2014662876 «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов», правообладатель Санкт-Петербургской горный университет .....	104
2.9. Прикладные задачи системного моделирования, работа с программой для ЭВМ №2016617578 «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов», Правообладатель Санкт-Петербургской горный университет .....	108
Модуль 3. Моделирование систем управления технологическими процессами .....	120
3.1. Основные понятия и принципы разработки математической модели технологического процесса.....	120
3.2. Основные виды математических моделей систем и способов их взаимодействия .....	126
3.3. Способы преобразования и математического описания структурных схем.....	135
3.4. Методы моделирования входного воздействия распределенного по одной пространственной координате.....	139
3.5. Методы моделирования входного воздействия распределенного по двум пространственным координатам .....	142
3.6. Методы моделирования двумерного распределенного объекта .....	146
3.7. Методы моделирования трехмерного распределенного объекта .....	150
3.8. Методы моделирования замкнутой системы управления с пространственно- усилительным звеном.....	153
3.9. Методы моделирования замкнутой распределенной системы управления с распределенным высокоточным регулятором.....	155
Модуль 4. Компьютерные технологии организации управления технологическими процессами .....	161
4.1. Обзор инструментов разработки систем управления технологическими процессами	161
4.2. Промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры.....	163
4.3. Устройства сбора и передачи информации.....	166
4.4. Основные направления развития современных средств автоматизации управления	170
4.5. Методы проведения исследования с MathCad .....	177
4.6. Методы проведения исследования с MatLab .....	184

## **ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

(Установочная лекция)

### Общие положения

1.1. Типовое проектное решение (ТПР) в области АСУ представляет комплект технической документации, содержащий проектные решения по части объекта проектирования, включая программные средства и предназначенный для многократного применения в процессе разработки, внедрения и функционирования АСУ с целью уменьшения трудоемкости разработки, сроков и затрат на создание АСУ и ее частей.

1.2. ТПР разрабатывают при наличии однородных объектов управления, для которых создание ТПР АСУ является экономически целесообразным.

ТПР является результатом работы по типизации, заключающейся в приведении к единообразию по установленным признакам наиболее рациональных индивидуальных (нетиповых) проектных решений, объединяемых областью применимости и общими требованиями к ним.

1.3. ТПР разрабатывают на объекты проектирования, охватывающие элементы различных видов обеспечения АСУ, постановки задач (комплексов задач) и на отдельные функции (комплексы функций) АСУ.

По числу охватываемых видов обеспечения ТПР подразделяется на простые и комбинированные. Простые ТПР охватывают один вид обеспечения. Комбинированные ТПР – два и более видов обеспечения АСУ по ГОСТ 24.103-84.

Примеры объектов проектирования для простых ТПР приведены в таблице.

Вид ТПР. Примеры объектов проектирования

- ТПР по информационному обеспечению Базы данных и их организация, классификаторы технико-экономической и нормативно-справочной информации, формы представления и организации данных в системе (в том числе формы документов, видеодиаграммы, массивы) данных и протоколы обмена данными.

- ТПР по программному обеспечению Программы общего и специального программного обеспечения АСУ

- ТПР по техническому обеспечению Комплексы средств, обеспечивающих ввод, подготовку, преобразование, обработку, хранение, регистрацию, вывод, отображение, передачу информации и средства реализации управляющих воздействий

- ТПР по организационному обеспечению Инструкции, определяющие функции подразделений управления, действия и взаимодействия персонала АСУ

- ТПР по лингвистическому обеспечению Тезаурусы и языки описания и манипулирования данными

- ТПР по математическому обеспечению Методы решения задач управления, модели и алгоритмы

- ТПР на постановку задачи Постановка задачи (комплекса задач) АСУ

- ТПР по функциям Подсистема АСУ, выделенная по функциональному признаку, функция АСУ, задача АСУ, комплексы функций и задач АСУ

1.4. Разработку ТПР осуществляют на основе использования проектных решений, реализованных в конкретных АСУ.

1.5. При использовании ТПР следует проводить его экспертизу с целью оценки научно-технического уровня, корректировки документации ТПР по результатам его применения в проектах конкретных систем и соответствия требованиям действующих стандартов.

1.6. Разработка, производство, поставка и применение типовых программных средств должны осуществляться в соответствии с «Положением о порядке разработки, производства, поставки и использования программных средств вычислительной техники, а также автоматизированных систем обработки информации».

1.7. Разработка, хранение, обращение, применение, корректировка, отмена ТПР, выполненных в виде документов, должны осуществляться в порядке, установленном в отрасли и в соответствии со стандартами системы технической документации на АСУ.

Современные технологии управления технологическими процессами направлены на решение следующих главных задач:

- повышение технико-экономической эффективности производства за счёт улучшения процесса сбора, обработки информации и её использования для целей управления;

- эффективность решения задач обеспечением оперативного взаимодействия человека-оператора и программно-технической части системы (человеко-машинного интерфейса и т.д.);

- обеспечение соответствия существующим европейским требованиям безопасности производства;

- решение задач эффективности управления за счет надежности, экологичности, безопасности производства и т.д.

Современный этап развития АСУТП характеризуется применением промышленных технологий создания и внедрения АСУТП на базе серийно программируемых логических контроллеров, совместимых с промышленными персональными компьютерами и программно-технических комплексов (ПТК) поддержки программирования АСУТП – SCADA систем, а также развития и стандартизации сетевых технологий.

Построение АСУТП на основе концепции открытых систем позволяет аппаратно-программные средства различных производителей совмещать на всех уровнях управления снизу доверху. При таком подходе значительно уменьшаются сроки создания и внедрения систем управления, общая стоимость системы в результате частичной и поэтапной замены имеющихся на предприятии устаревшей части аппаратно-программных средств.

«Автоматизация» - (от «ауто» – «само») – область науки и техники, связанная с вопросами управления без непосредственного участия человека.

«Автоматизация» - комплекс технических, методических, организационных и других мероприятий, направленных на создание автоматических систем управления (управления без участия человека), либо автоматизированных систем управления (управление с участием человека в процессе принятия решений на управление).

Системы автоматического управления (САУ)- комплекс технических средств, обеспечивающих автоматическое функционирование группы технологических процессов или технических средств без вмешательства человека.

Технологический объект управления (ТОУ) — это совокупность технологического оборудования и реализованного на нем технологического процесса производства.

Автоматизированный технологический комплекс (А Т К)-совместно функционирующие ТОУ и управляющая им АСУТП .

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) - человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятыми критериями управления.

Первоначально типовая АСУ выглядела как двухуровневая система: нижний уровень отвечал за сбор информации, а верхний - за принятие решения. Поток информации поступал от объекта управления оператору, который обменивался данными с ЭВМ и осуществлял управление объектом, то есть принимал решение.

Лицо принимающее решение - ЛПР (decision-maker — распространенный термин в системном анализе.), которым принято обозначать субъекта управления, чем подчеркивается его отличие от лиц готовящих, обосновывающих решение (или варианты, альтернативы решения). Вычислительные мощности использовались лишь для того, чтобы облегчить оператору или диспетчеру обработку поступающей информации.

Программируемые контроллеры, будучи по своей сути цифровыми (а значит, легко совместимыми с управляющими машинами верхнего уровня), имеют специализированные блоки для управления и связи со всевозможными аналоговыми, дискретными и цифровыми датчиками и исполнительными механизмами.

CASE–средства (Computer Aided Software Engineering). предназначенные для программирования задач, реализуемых подсистемами нижнего уровня АСУТП на промышленных микроконтроллерах (ремиконтах);

SCADA–программы (Supervisory Control and Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных). Эти программы позволяют обеспечить двустороннюю связь в реальном времени с объектом управления и контроля, визуализацию информации на экране монитора в любом удобном для оператора виде, контроль нештатных ситуаций, организацию удаленного доступа, хранение и обработку информации.

SCADA–системы предназначены для автоматизированного конфигурирования АСУТП из таких элементов как микроконтроллеры, компьютеры, технологические станции и т. д. и программирования задач отнесённых к SCADA – уровню.

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами – как правило, иерархически организованная двух – или трехуровневая система.

В англоязычной литературе нижнему уровню управления соответствует термин «control». На этом уровне выполняются следующие функции:

- сбора информации о состоянии технологического объекта управления (ТОУ);
  - поддержание технологических параметров на заданных значениях (уставах);
  - контроль за технологическими параметрами, для которых не выполняется функция регулирования;
  - сигнализация о параметрах, значения которых вышли за пределы, рассматриваемые как предельно допустимые;
  - блокировка управлений, являющихся результатом ошибочных действий технологического персонала;
  - противоаварийная защита (ПАЗ) процесса и производства при возникновении аварийных ситуаций.
- Подсистемами второго и, возможно, третьего уровней выполняются такие функции:
- архивирование событий;
  - вычисление (косвенное измерение) не измеряемых технологических параметров, показателей качества продуктов производства, отдельных технико-экономических показателей;
  - проверка или сведение материальных и энергетических балансов для аппаратов, установок, цехов и т.д.;
  - выработка управлений для предотвращения развития аварийных событий, в частности, подключение резервного оборудования, диагностика наличия и причины неисправности, формирование уставок для подсистем нижнего уровня и т. д.

Перечисленные задачи относят к «продвинутым» (advance). Общее название подсистем данного уровня в англоязычной литературе – «SCADA»-системы (Supervisor Control And Data Acvission).

В свою очередь на этом уровне выделяют подсистемы:

MES (Manufacturing execution system) – подсистемы исполнения производства или технического исполнения плана;

MRP (Manufacturing resource planning) – подсистемы планирования производства с учетом наличных ресурсов и возможностей технологии. Последняя подсистема с равным правом может быть отнесена также к уровню управления, который в англоязычной литературе обозначается термином «management» и соответствует задачам управления

производством и предприятием, решаемым автоматизированными системами управления производством (АСУП).

В конечном счете, перечисленные подсистемы АСУТП в целом обеспечивают оперативное управление производством в реальном масштабе времени («on line») по техническим, в частности, технологическим параметрам и показателям с учетом технических ограничений.

В общем же случае управление производством по экономическим критериям и технико-экономическим показателям осуществляется АСУП, для которых основной целью управления является планирование производства и автоматизация процессов документооборота (режим работы «off line»), в частности, процессов снабжения производства сырьем, сбыта продукции, финансовых процессов. Задачи последнего типа относятся к области интересов логистики.

На уровне АСУП выделяют:

- задачу планирования (управления) ресурсами ERP (Enterprise Resource Planning);

-- задачу управления основными фондами и имуществом EAM (Enterprise Asset Management).

АСУП можно рассматривать как ядро или одну из главных и необходимых подсистем Интегрированных систем управления предприятием (ИСУ), целью построения и работы которых является выполнение функций АСУТП, автоматизация бизнес-процессов, когда основной задачей является представление информации в виде, необходимом для принятия решений, автоматизация задач планирования и проектирования (основная задача – автоматизация рабочего места (АРМ) лица, выполняющего соответствующую организационную работу) и т.д. Заметим, что в ИСУ обеспечивается автоматизированная информационная связь между подсистемами АСУТП, АСУП, АРМами.

Одной из основных задач, решаемых SCADA-системами, является обеспечение высокого уровня сервиса при представлении информации о процессе. Поэтому иногда SCADA-пакеты, предназначенные главным образом для визуализации и удобного представления информации, получили название MMI – систем (Man Machine Interface).

На верхнем уровне АСУ ТП размещены мощные компьютеры, выполняющие функции серверов баз данных и рабочих станций и обеспечивающие анализ и хранение всей поступившей информации за любой заданный интервал времени, а также визуализацию информации и взаимодействие с оператором. Основой программного обеспечения верхнего уровня являются пакеты SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - системы управления и доступа к данным).

18. Для управления непрерывными технологическими процессами (заводскими) существуют специализированные программно-аппаратные средства, которые получили название Distributed Control Systems – DCS (распределенные системы управления - РСУ).

Так как в последнее время появились многочисленные модификации персональных компьютеров в промышленном исполнении, и повысилась надежность их работы, персональные компьютеры (ПК) стали активно применяться для автоматизации производственных объектов. К важным достоинствам ПК следует отнести открытую архитектуру, легкость подключения любых блоков ввода/вывода, выпускаемых третьими фирмами, возможности по использованию широкой номенклатуры наработанного программного обеспечения (операционных систем реального времени, баз данных, пакетов прикладных программ контроля и управления). Контроллеры на базе ПК, как правило, управляют сравнительно небольшими замкнутыми объектами. Общее число входов/выходов контроллера на базе ПК обычно не превосходит нескольких десятков соединений, а набор функций предусматривает либо сложную обработку измерительной информации с расчетом нескольких управляющих команд, либо вычисления по специализированным формулам, аргументами которых выступают

измеряемые величины.

В общих терминах можно указать следующие условия, очерчивающие область применения контроллеров на базе ПК в промышленности:

- выполняется большой объем вычислений за достаточно малый интервал времени при небольшом количестве входов и выходов объекта (необходима большая вычислительная мощность);
- средства автоматизации работают в окружающей среде, не отличающейся от условий работы офисных персональных компьютеров;
- операторам практически не требуется мощная аппаратная поддержка работы в критических условиях, которая обеспечивается обычными контроллерами. К функциям такой поддержки относятся: глубокая диагностика работы вычислительных устройств, меры автоматического резервирования, в т. ч. устранение неисправностей без останова устройства (использование жесткого малого времени цикла контроллера), модификация программных компонентов во время работы системы автоматизации и т. д.;
- контроллер выполняет нестандартные функции, которые целесообразно программировать не на специальном технологическом языке, а на обычном языке программирования высокого уровня, типа C++, Pascal.

## МОДУЛЬ 1. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### 1.1. Классификация современных технологических процессов

(лекция)

Элементы являются составными частями каждой системы. Они могут быть в свою очередь, системами, тогда они называются подсистемами. Элементы систем могут быть естественными и искусственными, живыми и неживыми. Большинство систем включают в те, и другие элементы. Элементы, поступающие в систему, называются входными, а выходящие из нее – выходными. Процесс преобразования. В организованных системах идет процесс преобразования, в ходе которого элементы изменяют свое состояние. В процессе преобразования входные элементы трансформируются в выходные. В организованной системе полезность (ценность) входных элементов при этом увеличивается. Если же в процессе преобразования полезность элементов уменьшается, то затраты в системе увеличиваются, а ее эффективность уменьшается. Входные элементы (входы), ресурсы и затраты. Входными называются элементы, поступающие в систему, для которых система предназначена, например, для измерительного прибора – измеряемая величина; для компьютера – исходная информация о задаче; для автомобиля – объект перевозки (груз, пассажир) и т.п. Различия между входами и ресурсами незначительны и зависят лишь от точки зрения и условий. В системном анализе они определяются с позиций назначения системы. Входные элементы, как правило, преобразуются в системе, а ресурсы расходуются (используются). В общем случае ресурсы подразделяются на материальные (например, топливо в автомобиле), энергетические, информационные, финансовые (деньги), временные, физические (усилия). Например, студенты, входящие в систему образования, являются входными элементами, а преподаватели – один из ресурсов, используемых в процессе преобразования. В рамках большой системы (общество) студенты, получившие образование, преобразуются в ресурсы, когда становятся активными членами общества. Вообще, личный состав (преподаватели, обслуживающий и административный персонал), капитал (который включает землю, оборудование, помещения, снабжение), талант, квалификация, информация могут рассматриваться как входные элементы или как ресурсы, используемые в системе образования. Определяя входные элементы и ресурсы систем, важно указать, контролируются ли они проектировщиком системы, т.е. следует ли их рассматривать как часть системы или как часть окружающей среды. При оценке эффективности системы входные элементы и ресурсы обычно относят к затратам. Затраты – это количественная оценка расхода ресурсов в принятых единицах, например для автомобиля – это оценка расхода топлива, денег, времени, усилий на перевозку. Выходные элементы (выходы), результаты и прибыль. Выходными называются элементы, выходящие из системы и представляющие собой, как правило, результат процесса преобразования в системе. Например, для измерительного прибора выход – результат измерения, для компьютера – результат решения задачи (информация о решении), для автомобиля – объект перевозки (груз, пассажир), доставленный в пункт назначения. Под результатами понимаются положительные последствия (политические, социальные, экономические, экологические и т.п.) функционирования системы. В частности, для технических систем они могут оцениваться как экономия денег, времени, усилий, положительные эмоции и т.п. Например, для автомобиля – это сам факт перевозки, а также экономия на перевозку и за счет перевозки для систем верхнего уровня. Отрицательные последствия принято относить к затратам. Например, автомобиль загрязняет среду – это тоже последствие, но отрицательное, которое относят к затратам, как дополнительный расход денег, времени, усилий на предотвращение загрязнения либо на восстановление среды. При оценке эффективности системы выходы и результаты обычно относят к прибыли. Прибыль – это количественная оценка результатов в принятых единицах (аналогично затратам),

например, для автомобиля – это оценка экономии денег, времени и усилий за счет перевозки для систем верхнего уровня. Окружающая среда. Установление границ совершенно необходимо, когда мы изучаем системы. Установление границ определяет, какие системы можно считать находящимися под контролем лица, принимающего решения (ЛПР), а какие остаются вне его влияния. Однако, как бы ни устанавливались границы системы, нельзя игнорировать ее взаимодействие со средой, так как принятые решения в этом случае могут оказаться бессмысленными. Окружающая среда — совокупность систем, изменение свойств которых влияет на рассматриваемую систему, а также систем, свойства которых меняются под воздействием рассматриваемой системы. Системы, у которых взаимодействие с окружающей средой полностью отсутствует, называются абсолютно закрытыми. Примерами таких систем являются абстрактные (модельные) системы, используемые в математике и физике. Системы, у которых это взаимодействие мало (т.е. рассматривается как малый параметр) – относительно закрытыми. Примером таких систем является большинство технических систем. Системы, у которых взаимодействие с окружающей средой существенно, называются открытыми. К ним относятся социальные и организационно-технические системы. Открытые системы (или их части), которые подвергаются изучению, называются объектами, при этом система рассматривается как объект, погруженный в окружающую среду. Назначение и функция. Назначение – это функция, для выполнения которой система пригодна в наибольшей степени. Неживые системы не имеют явного назначения. Они получают специфическое назначение или наделяются функцией, когда вступают во взаимоотношения с другими подсистемами в рамках большой системы. Таким образом, связи подсистем между собой и с системой в целом очень важны при изучении систем. Для технических систем назначение очевидно, так как они создаются для выполнения определенной функции, например, измерительный прибор – для измерения, компьютер – для обработки информации, автомобиль – для перевозки и т.п. Однако, когда мы переходим к более сложным системам – социальным, организационно-техническим, ясность утрачивается. Даже назначение одного человека нам не известно, тем более это относится к объединениям людей, что создает неопределенность при проектировании таких систем. Признаки. Системы, подсистемы и их элементы обладают признаками (атрибутами, свойствами, характеристиками). Признаки могут быть "количественными" или "качественными". В зависимости от такого деления определяется и подход к их измерению. "Качественные" признаки труднее измерить чем "количественные". Термин "признак" иногда используют как синоним "мера эффективности", хотя признак и его меру следует различать. Чем сложнее система, тем труднее измерить ее свойства точными числами. Для социальных и организационно-технических систем используются интервальные, балльные или словесные (нечеткие) оценки. Задачи и цели. При проектировании систем первостепенное значение имеет определение их задач и целей. По мере того, как мы отходим от абстрактных рассуждений, установление назначения системы становится более четким и рабочим. Формулирование конкретной цели является очень важным при решении задачи. Цель – это назначение системы с учетом условий и ограничений задачи. Большинство систем являются многоцелевыми, так как для любой системы можно составить несколько наборов ограничений. Определение цели позволяет сформировать исходное множество допустимых систем (решений) для достижения этой цели, при этом функция выбора уточняется. Поясним сказанное примером. Пусть требуется перевести груз, выбрав для этого наиболее пригодный автомобиль. Пока мы находимся на уровне назначения – что-то куда-то перевезти, функция выбора имеет вид прямоугольника, т.е. подходят все автомобили (полная неопределенность выбора). Сформулируем набор ограничений: а) тип груза: твердые строительные материалы; б) масса груза: 1 ÷ 1,5 т; в) расстояние: 60 ÷ 80 км; г) время перевозки: 1 ÷ 1,5 час; д) местность: город и ближайшие окрестности; е) сохранность груза: потери не более

0,1 % и т.д. Предполагается также выполнение условий: наличие парка автомобилей, наличие инфраструктуры (дорог, терминалов и т.п.). Набор ограничений задает конкретную цель и сужает множество решений, т.е. систем, пригодных для ее достижения. Функция выбора теперь становится одномодальной с выраженным максимумом, вблизи которого и следует выбирать допустимые решения, т.е. в нашем примере – марки автомобилей. Меры эффективности (критерии) показывают, в какой степени достигаются цели системы, и дают представление о количественной величине проявления признаков системы. Для этого строится так называемое дерево оценок, состоящее из трех уровней. К критериям первого уровня относятся критерии полноты, качества и эффективности достижения цели. Например, для транспортной системы города – это полнота, качество и эффективность выполнения перевозок. К критериям второго уровня относятся показатели (факторы), к критериям третьего уровня – непосредственно измеряемые величины и параметры. Для больших систем используются все три уровня критериев, для технических систем, как правило, 2-й, и 3-й. Для больших систем критерии 2-го уровня включают политические, социальные, экономические, технологические факторы и т.п. Для технических систем, как правило, используются функциональные, технико-экономические, эргономические показатели. Иногда используются также специальные показатели, определяемые спецификой задачи. Например, для автомобиля к функциональным критериям относятся вместимость (грузоподъемность), мощность двигателя, максимальная скорость, универсальность и т.п.

Системный подход с точки зрения управления. При использовании системного подхода особого внимания заслуживают четыре важные проблемы: 1) определение границ системы в целом, границ окружающей среды, или окружения; 2) установление целей системы; 3) определение структуры программы и построение матрицы "программы – элементы"; 4) описание управления системой. Определение границ системы в целом и окружающей среды. Окружающая среда – системы, не учитывает и не контролирует ЛПР. Границы, отделяющие систему от ее окружения, не совпадают с установленными организационными границами. Рассматриваемая система не завершается совокупностью всех элементов организации. Чтобы лучше уяснить это, напомним, что системный анализ применяется, когда нужно решить какую-то проблему. Система в целом включает все системы, которые, как полагают, будут влиять на рассматриваемую проблему или будут подвергаться ее влиянию, независимо от того, к какой организации они относятся. Методом исключения мы относим к окружающей среде все системы из системы в целом, не входящие в нее при решении данной проблемы. Если в систему в целом включить мало систем, то это приведет к упрощению и неверным решениям; если же много, то усложнится описание, не хватит ресурсов, и мы не сможем найти решение. Таким образом, установление границ системы – вопрос целей анализа, требуемой точности результата и имеющихся в наличии ресурсов. Например, при рассмотрении движения тела вблизи поверхности Земли в первом приближении можно считать систему "тело – Земля" закрытой (так как все тела падают с ускорением свободного падения). Если мы хотим уточнить результат (например, при рассмотрении движения парашюта), то необходимо учесть сопротивление воздуха, т.е. включить в систему физическую среду. Наконец, при рассмотрении траектории движения космического корабля нужно учесть влияние Луны, других планет, т.е. включить их в систему. В качестве примера, как определение границ влияет на принятие решений, рассмотрим деятельность фирмы. Например, как определить систему, когда рассматриваются затруднения со сбытом продукции? Система может включать или одну данную фирму, или все аналогичные фирмы, или даже всю экономику, т.е. нужно учесть состояние дел на других фирмах, в экономике (возможно причина проблемы – в неправильной стратегии или в нестабильности финансовой ситуации). Обсуждая вопрос об увеличении дивидендов, администрация должна учесть не только уровень доходов фирмы и ее финансовое положение, но и изучить, какое влияние окажут

эти факторы на стоимость акций компании, возможность продажи ценных бумаг, получения займов и т.д. Увеличение дивидендов обеспечит выгоду держателям акций за счет компонентов системы (фирмы), таких, как служащие, поставщики или потребители. Выгода для одной группы лиц может означать ущерб для другой. Каждый участник системы оценивает работу фирмы по разным критериям. Для держателей акций таким критерием является стоимость ценных бумаг, для служащих – уровень зарплаты и гарантия рабочего места. Поставщик считает критерием своевременность оплаты поставок, а потребитель – качество продукции фирмы. Одно и то же решение не может быть выгодно для всех. Улучшение качества удовлетворит потребителя, но повысит себестоимость, что повлияет на прибыль (если не удастся изменить цену). Уменьшение прибыли влияет на стоимость акций и может повредить интересам их держателей. Согласование всех требований к системе – обязанность администрации. Она должна удовлетворить противоречивые требования участников: держателей акций, кредиторов, служащих, потребителей, поставщиков, правительства, профсоюзов, конкурентов, местного населения, общества в целом. Из-за этого работа руководителя особенно сложна. Он обязан следить, чтобы подсистемы, работая относительно независимо, не отклонялись от того, что считается оптимальным на уровне всей системы. Приведенный пример показывает, как установление целей связано с установлением границ системы и выбором критериев эффективности системы. Если принимаются во внимание новые системы и их интересы, то цели меняются. Каждое решение влияет на другие системы. Определение структуры программы и построение матрицы "программы-элементы". После того, как установлены границы, сформулированы цели данной системы, выполнение связанных с ними функций можно организовать в программы. Структура программы – это представление отношений всех элементов системы в соответствии с теми функциями, которые они выполняют независимо от их территориальных, юридических и формально-организационных границ. Можно представить структуру программы как блок-схему, указывающую зависимости между различными формами деятельности организации в соответствии с их функциями и целями, или как возможные пути достижения некоторого множества целей. Матрица "программы-элементы" соотносит элементы с различными программами. Сгруппированные в соответствии с данной программой (функцией), они образуют то, что называется компонентом системы. Компоненты характеризуются двумя свойствами: а) направлены на достижение одной и той же цели; б) для них не обязательно удовлетворять традиционным границам. Описание управления системой. Управление включает все действия и всех ЛПР, которые входят в процессы планирования, оценки, реализации проекта и контроля. Весьма трудно разделять роли планировщика системы и того, кто ею управляет. Принимая решения, планировщик влияет на работу системы, а ЛПР выполняет функции планировщика, когда определяет цели, ресурсы и принимает решения, изменяющие структуру системы и результаты ее работы. Поэтому при системном подходе различия их ролей стремятся свести к минимуму, чтобы совместить оптимизацию системы и оперативные решения.

Суммируя сказанное, отметим основные особенности системы:

1. Система рассматривается как своеобразный преобразователь, взаимодействующий с окружающей средой, который преобразует входы, ресурсы и затраты в выходы, результаты и прибыль.

2. Система имеет собственные нетривиальные структуру и поведение и действует по программе (программам), направленной на достижение определенной цели (целей), задаваемой ЛПР.

3. При выполнении программы в системе протекают процессы, изменяющие состояния подсистем (элементов). В каждом состоянии происходит дифференциация (разделение) внешних систем, влияющих на достижение цели. При этом системы, которые учитываются при достижении цели, образуют систему в целом; системы, которые не

учитываются, относятся к окружающей среде. Тем самым устанавливаются границы, в рамках которых действует система.

4. Степень достижения цели (целей) оценивается по критериям (мерам эффективности), число и состав которых зависят от границ системы.

## **1.2. Основы методов организации управления технологическими процессами**

В основе любого производства лежит технологический процесс, под которыми понимаются совокупность действий по добыче и переработки сырья в готовую продукцию. В основе любых процессов лежат физические, химические, биологические процессы, различающиеся характером количественных и качественных изменений сырья в процессе его переработки.

Основная классификация технологических процессов является способ организации и кратность обработки сырья.

Виды технологических процессов в зависимости от способа их организации: единичный, типовой, групповой, дискретный (прерывный, периодический), непрерывный и комбинированный.

Единичный технологический процесс (ЕТП) разрабатывается для изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Разработка ЕТП включает в себя следующие этапы.

1. Анализ исходных данных и выбор действующего аналога ЕТП.
2. Выбор исходной заготовки и метода ее получения.
3. Определение содержания операций, выбор технологических баз и составление технологического маршрута (последовательности) обработки.
4. Выбор технологического оборудования, оснастки, средств автоматизации и механизации технологического процесса. Уточнение последовательности выполнения переходов.
5. Назначение и расчет режимов выполнения операции, нормирование переходов и операций ТП, определение профессий и квалификации исполнителей, установление требований к технике безопасности.
6. Расчет точности, производительности и экономической эффективности ТП. Выбор оптимального процесса.
7. Оформление рабочей технологической документации.

Необходимость каждого этапа, состава задач и последовательности решения устанавливается в зависимости от типа производства.

Типизация ТП позволяет устранить их многообразие с обоснованным сведением к ограниченному числу типов.

Типовой технологический процесс (ТПП) характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками.

Типизацию начинают с классификации изделий. Классом называют совокупность деталей, характеризующихся общностью технологических задач. В пределах класса детали разбивают на группы, подгруппы и т.д. до типа. Практически к одному типу относят детали, для которых можно составить один технологический процесс.

ТПП разрабатывают с учетом последних достижений науки и техники, опыта передовых рабочих, что позволяет значительно сократить цикл подготовки производства и повысить производительность за счет применения более совершенных методов производства.

Групповой технологический процесс (ГТП) предназначен для совместного изготовления или ремонта групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

При группировании одна из наиболее сложных деталей принимается за комплексную. Эта деталь должна иметь все поверхности, встречающиеся у деталей

данной группы. Они могут быть расположены в иной последовательности, чем у комплексной детали. При отсутствии такой детали в группе создается условная комплексная деталь. По этому технологическому процессу можно обрабатывать любую деталь группы без значительных отклонений от общей схемы.

Групповые технологические процессы используют для механической обработки деталей на универсальном оборудовании, для электромонтажных, сборочных и других операций, что делает целесообразным применение высокопроизводительных автоматов и полуавтоматов в мелкосерийном производстве.

Периодические процессы (например, выплавка стали, литье в форму, термообработка и др.) проводятся на оборудовании, которое загружается исходными материалами или заготовками через определенные промежутки времени; после их обработки полученный продукт выгружается. Периодические или дискретные процессы характеризуются чередованием во времени рабочих и вспомогательных операций, выполняются они, как правило, на одном месте. Они компактны в пространстве и растянуты по времени. Основным недостатком таких процессов является то, что во время загрузки и выгрузки продукта оборудование не работает (простаивает) или работает не в полную мощность. Это приводит к потерям рабочего времени и большим затратам труда. Кроме того, непостоянство технологического режима в начале и конце процесса усложняет обслуживание, затрудняет автоматизацию и приводит к удлинению продолжительности производительного цикла. Все эти причины и побуждают заменять периодические процессы более рациональными при наличии экономической и технической возможности.

Непрерывные процессы (например, разливка стали, прокатка или волочение профилей из металлов и сплавов, переработка нефти, производства цемента) осуществляются в аппаратах, где поступление сырья и выгрузка конечных продуктов производятся непрерывно. Однако все стадии процесса могут протекать одновременно как в различных частях аппарата (например, перегонка нефти в ректификационной колонне), так и в различных аппаратах, составляющих данную установку. Они характеризуются непрерывным и одновременным выполнением рабочих и вспомогательных технологических действий, но на разных местах. Параллельность выполнения операций позволяет значительно повысить производительность, но требует увеличения пространства.

Комбинированные процессы являются сочетанием стадий периодических и непрерывных процессов (например, поточные линии механической обработки деталей, коксование угля, работа доменной печи или стана периодической прокатки металлических профилей). Комбинированные технологические процессы позволяют удачно сочетать преимущества периодических и непрерывных действий и устранить их недостатки.

По сравнению с комбинированными и периодическими процессами непрерывные отличаются отсутствием простоев оборудования, перерывов в выпуске конечных продуктов, возможностью полной автоматизации и механизации, устойчивостью технологического режима и соответственно большей стабильностью качества выполняемой работы, в т. ч. и готовой продукции. Например, слитки металлов и сплавов, изготовленные в установках непрерывной разливки, отличаются более высоким качеством и отсутствием дефектов, характерных для слитков, полученных в изложницах (обычное литье). Большая компактность оборудования обеспечивает меньшие капитальные затраты и эксплуатационные расходы на ремонт и обслуживание, уменьшает потребность в рабочей силе, увеличивает производительность труда, позволяет полнее и эффективнее использовать энергетические ресурсы. По этим причинам основной тенденцией промышленного производства массового типа является замена периодических процессов непрерывными. Но, как правило, технологическое оборудование для непрерывных процессов является более сложным и дорогим.

Сейчас периодические процессы сохраняют свое значение в производствах относительно небольшого масштаба (в том числе опытных) с разнообразным ассортиментом продукции. Там применение указанных процессов позволяет достичь большой гибкости в использовании оборудования при меньших затратах.

2. По кратности обработки сырья различают процессы: с разомкнутой (открытой) схемой, в которой сырье или материал подвергается однократной обработке; с замкнутой (круговой, циркуляционной или циклической) схемой, в которой сырье или вспомогательные материалы неоднократно возвращаются в начальную стадию процесса для повторной обработки, а иногда и регенерации (восстановление потерянных свойств); комбинированные (со смешанной схемой).

Примером процесса с разомкнутой (открытой) схемой является конвертерный способ получения стали. Примером процесса с замкнутой схемой может служить циркуляция специальной жидкой смеси для охлаждения резца токарного станка при скоростной механической обработке металлов резанием. В такой замкнутой схеме охлаждающая жидкость постоянно циркулирует между бачком, резцом, сборником для жидкости и насосом для ее перекачивания в бачок. Другим примером процесса с замкнутым циклом может быть химическая переработка нефтяных фракций, где для непрерывного восстановления активности катализатора последний постоянно циркулирует между реакционной зоной крекинга и прокалочной печью для выжигания углерода с его поверхности.

Процессы с замкнутой схемой более компактны, чем процессы с разомкнутой схемой, требуют по сравнению с ними меньшего расхода сырья, вспомогательных материалов и энергии на транспортировку реагентов. Циклические (с замкнутой схемой) процессы широко используются во многих производствах для многократного или частичного возвращения тепловых или материальных потоков в начальную стадию процесса. Это позволяет рационально и экономно расходовать энергию, сырье, материалы и водные ресурсы, получать продукцию высокого качества. Наиболее совершенные технологические процессы – процессы с замкнутой схемой – являются основой создания безотходных, материало- и энергосберегающих производств.

В промышленности часто применяют комбинированные процессы (со смешанной схемой), являющиеся сочетанием процессов с открытой и закрытой схемой (например, производство серной кислоты нитрозным способом). В таких процессах одни промежуточные продукты (оксиды серы) обрабатываются по открытой схеме, проходя последовательно ряд аппаратов, а другие (оксиды азота) – циркулируют по замкнутой схеме.

3. Классификация технологических процессов по способам переработки сырья. В основе переработки сырья лежат физические, механические, химические и биологические процессы, различающиеся между собой характером качественных изменений и превращений вещества.

Физические технологические процессы. Так, использование физических процессов для переработки сырья характеризуется изменением состояния (твердое, жидкое газообразное), внешней формы и физических свойств. Эти ТП могут быть реализованы при изменении параметров окружающей предмет труда условий, например температуры, давления, электромагнитного поля, ионизирующего и радиоактивного излучений и т.п. Как правило, физические технологические процессы в чистом виде редко реализуются, часто они вызывают и химические превращения, тогда такие процессы превращаются в физико-химические. Чистые физические процессы – превращение воды в пар или лед и наоборот; превращение графита под действием температуры и давления в алмаз, расплавление или затвердевание чистых металлов или веществ. Физико-химический процесс – это расплавление руды или металлолома и получение жидкого сплава, который

при затвердевании не только переходит в твердое тело, но и претерпевает химическое превращение, изменяется кристаллическая решетка и структура сплава.

Часто использование физических технологических процессов при изготовлении некоторых изделий позволяет существенно повысить качество и эффективность работы. В частности, в современном машиностроении получают все большее распространение материалы, которые отличаются высокой твердостью и вязкостью, трудно поддающиеся традиционным способам обработки. Все возрастающее количество применяемых штампов и пресс-форм отличается высокой сложностью внутренних полостей. Это послужило основанием создания и внедрения в производство высокоэффективных электрофизических (ЭФ) и электрохимических (ЭХ) методов обработки, сущность которых заключается в том, что обработка облегчается благодаря ослаблению связей между элементарными объемами заготовки за счет их нагрева, расплавления и удаления из зоны обработки или перевода сплава в легко удаляемое соединение.

При электрофизической обработке используют инструмент – электрод, который может быть изготовлен из легкообрабатываемого материала (меди, графита, медно-графитовой композиции и т. п.). При сближении в жидком диэлектрике электродов, инструмента и заготовки возникает электрический разряд, и через зазор между ними начинает течь электрический ток. Электроны, соударяясь с анодом (заготовкой), интенсивно его разогревают и расплавляют микрообъемы заготовки. Расплавленные частички сплава охлаждаются жидким диэлектриком и удаляются из зазора между инструментом и заготовкой. Электрофизические методы отличаются высокой концентрацией энергии (1000–100000000 Вт/см<sup>2</sup>) на локальных участках обрабатываемой заготовки, частицы материала удаляются с поверхности в расплавленном или парообразном состоянии. На электроэрозионных станках можно выполнять сложные полости в заготовках, резать и сверлить их, шлифовать и полировать. При полировке отпадает необходимость в применении инструмента, достаточно обеспечить мощный разряд между полируемым изделием и водным раствором поваренной соли.

Разновидностями ЭФ являются электроэрозионная, электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная и плазменная обработка.

Характерной особенностью электроэрозионной (электроразрядной) обработки является то, что электрический пробой происходит по кратчайшему пути, что предопределяет разрушение (оплавление) наиболее близкорасположенных участков заготовки. Поэтому при выполнении углублений (полостей) или отверстий обрабатываемая поверхность заготовки принимает форму электрода. Известно, что механическая обработка наружных поверхностей заготовки значительно проще, производительнее и экономичнее, может быть выполнена более качественно, чем внутренних поверхностей, при этом может использоваться простой инструмент и универсальное оборудование.

Механические технологические процессы. В производстве более 80% технологических процессов – это механические, в результате которых изменяются форма, качество поверхности, геометрические размеры и свойства предмета обработки. Так при пластической деформации металлической заготовки придают требуемую форму и геометрические размеры, параллельно изменяются и физические свойства сплава заготовки (наклеп и упрочнение). Применяя механические технологические процессы, получают листы, сортовой прокат, поковки, трубы, проволоку и многое другое. При обработке резанием путем снятия стружки заготовке придают определенную форму и размеры, превращают ее в будущую деталь, которая в результате такой обработки приобретает заданную точность геометрических размеров с соответствующей шероховатостью поверхностей. При такой обработке свойства материала заготовки не изменяются.

При выполнении разъемных соединений деталей и узлов изделия реализуется типичный механический технологический процесс, большинство сборочных ТП базируются на чисто механических процессах (завернуть винт или гайку, запрессовать подшипник или втулку, выполнить клепанное соединение, развальцевать, зашплинтовать и т. д.), причем выполнение операций по соединению отдельных деталей или узлов не требуют высокой квалификации исполнителей и эти операции могут быть легко автоматизированы, особенно при массовом типе производства.

Механические технологические процессы широко используются в горнодобывающей промышленности, при измельчении, смешивании, дозировке, сортировке, уплотнении, формовки, упаковки сырья и материалов.

Химические процессы, в отличие от физических и механических, характеризуются изменением не только физических свойств, но и агрегатного состояния, химического состава и внутреннего строения веществ. Например, химической переработкой природного газа из метана получают водород, этилен, ацетилен, метиловый спирт и другие продукты; гидролизом древесины – скипидар, деготь, камфару, ванилин, спирты, канифоль.

Химические процессы лежат в основе жизнедеятельности живых организмов. В технологии промышленного производства термин "химические процессы" следует понимать в широком смысле и не отождествлять с производством только химических веществ. Химико-технологические процессы являются основой производства многих строительных материалов, металлов и пищевых продуктов, используются в машиностроении, при производстве радиоэлектронной аппаратуры, измерительной техники, изделий легкой промышленности. Химические технологические процессы играют важную роль в развитии электроники, биотехнологии и создании новых материалов с уникальными свойствами, без которых немислимо современное производство многих товаров с высокими качественными показателями.

## **1.2. Определение системы. Классификация системного анализа систем**

(лекция)

Системы разделяют на классы по различным признакам, и в зависимости от решаемой задачи можно выбирать разные принципы классификации.

Предпринимались попытки классифицировать системы по следующим признакам:

- по виду отображаемого объекта (технические, биологические, экономические и т.п. системы);
- виду научного направления, используемого для их моделирования (математические, физические, химические и др.);
- взаимодействию со средой (открытые и закрытые);
- величине и сложности.

Предлагалось также различать следующие типы систем:

детерминированные и стохастические;

абстрактные и материальные (существующие в объективной реальности); и т.д.

Классификации всегда относительны. Так, в детерминированной системе можно найти элементы стохастичности, и, напротив, детерминированную систему можно считать частным случаем стохастической (при вероятности равной единице).

Аналогично, если принять во внимание диалектику субъективного и объективного в системе, то станет понятной относительность разделения систем на абстрактные и объективно существующие: это могут быть стадии развития одной и той же системы.

Действительно, естественные и искусственные объекты, отражаясь в сознании человека, выступают в роли абстракций, понятий, а абстрактные проекты создаваемых систем воплощаются в реально существующие объекты, которые можно ощутить, а при изучении снова отразить в виде абстрактной системы.

Однако относительность классификаций не должна останавливать исследователей. Цель любой классификации – ограничить выбор подходов к отображению системы, сопоставить выделенным классам приемы и методы системного анализа и дать рекомендации по выбору методов для соответствующего класса систем. При этом система, в принципе, может быть одновременно охарактеризована несколькими признаками, т.е. ей может быть найдено место одновременно в разных классификациях, каждая из которых может оказаться полезной при выборе методов моделирования.

Рассмотрим некоторые из наиболее важных классификаций систем.

Открытые и закрытые системы. Понятие "открытая система" ввел Л. фон Берталанфи. Основные отличительные черты открытых систем – способность обмениваться со средой массой, энергией и информацией. В отличие от них предполагается, что закрытые системы (разумеется, с точностью до принятой чувствительности модели) полностью лишены этой способности, т.е. изолированы от среды.

Возможны частные случаи: например, не учитываются гравитационные и энергетические процессы, а в модели системы отражается только обмен информацией со средой; тогда говорят об информационно-проницаемых или, соответственно, об информационно-непроницаемых системах.

Одна из наиболее важных состоит в следующем. В открытых системах "проявляются термодинамические закономерности, которые кажутся парадоксальными и противоречат второму началу термодинамики" [17, с. 42]. Напомним, что второй закон термодинамики ("второе начало"), сформулированный для закрытых систем, характеризует систему ростом энтропии, стремлением к неупорядоченности, разрушению.

Проявляется этот закон и в открытых системах (например, старение биологических систем). Однако (в отличие от закрытых систем) в открытых системах возможен "вывод энтропии", ее снижение; "подобные системы могут сохранять свой высокий уровень и даже развиваться в сторону увеличения порядка сложности" [17, с. 42], т.е. в них проявляется рассматриваемая в следующем параграфе закономерность самоорганизации (хотя Берталанфи этот термин еще не использовал). Именно поэтому важно для системы управления поддерживать хороший обмен информацией со средой.

Целенаправленные, целеустремленные системы. При изучении экономических, организационных объектов важно выделять класс целенаправленных или целеустремленных систем [91, 92 и др.].

В этом классе, в свою очередь, можно выделить системы, в которых цели задаются извне (обычно это имеет место в закрытых системах), и системы, в которых цели формируются внутри (что характерно для открытых, самоорганизующихся систем).

Классификации систем по сложности. Существует несколько подходов к разделению систем по сложности.

Вначале термины "большая система" и "сложная система" использовались как синонимы.

Некоторые исследователи связывали сложность с числом элементов.

Пример

Г. Н. Поваров[1] в зависимости от числа элементов, входящих в систему, выделяет четыре их класса: малые системы (10–103 элементов), сложные (104–106 элементов), ультрасложные (107–1030 элементов), суперсистемы (1030–10200 элементов).

У. Р. Эшби считал, что система является большой с точки зрения наблюдателя, возможности которого она превосходит в каком-то аспекте, важном для достижения цели.

При этом один и тот же материальный объект в зависимости от цели наблюдателя и средств, имеющихся в его распоряжении, можно отображать или не отображать большой системой, и, кроме того, физические размеры объекта не являются критерием отнесения объекта к классу больших систем.

Н. П. Бусленко предложил (в силу отсутствия четкого определения отнесения системы к разряду больших и относительной условности этого понятия) связывать понятие "большая система" с тем, какую роль играют при изучении системы комплексные общесистемные вопросы, что, естественно, зависит от свойств систем и классов решаемых задач.

Для сфер биологических, экономических, социальных систем иногда понятие большой системы связывали в значительной степени с важными для них понятиями "эмерджентность", "открытость", "активность элементов". В результате чего такая система обладает как бы "свободой воли", нестабильным и непредсказуемым поведением и другими характеристиками развивающихся, самоорганизующихся систем.

В то же время есть и иные точки зрения: поскольку это разные слова в естественном языке, то и использовать их нужно как различные понятия.

Существуют и более убедительные обоснования различия понятий "большая система" и "сложная система".

Понятия большой и сложной системы Черняк связывает с понятием "наблюдатель" (на рис. 1.20 "наблюдатели" представлены прямоугольниками): для изучения большой системы необходим один "наблюдатель" (имеется в виду не число людей, принимающих участие в исследовании или проектировании системы, а относительная однородность их квалификации: например, инженер или экономист), а для понимания сложной системы – нужно несколько "наблюдателей", принципиально разной квалификации (например, инженер-машинист, программист, специалист по вычислительной технике, экономист, а возможно, и юрист, психолог и т.п.).

В классификации К. Боулдинга каждый последующий класс включает в себя предыдущий, характеризуется большим проявлением свойств открытости и стохастичности поведения, более ярко выраженными проявлениями закономерностей иерархичности и историчности (рассматриваемых в параграфе 1.6), хотя это не всегда отмечается, а также более сложными "механизмами" функционирования и развития.

Оценивая классификации с точки зрения их использования при выборе методов моделирования систем, следует отметить, что такие рекомендации (вплоть до выбора математических методов) имеются в них только для классов относительно низкой сложности (в классификации К. Боулдинга, например, – для уровня неживых систем). Для более сложных систем оговаривается, что дать такие рекомендации трудно. Поэтому далее рассматривается классификация, в которой делается попытка связать выбор методов моделирования со всеми классами систем. Основанием этой классификации является степень организованности.

Представление объекта или процесса принятия решения в виде хорошо организованной системы возможно в тех случаях, когда исследователю удается определить все ее элементы и их взаимосвязи между собой и с целями системы в виде детерминированных (аналитических, графических) зависимостей.

В этот класс систем включается большинство моделей физических процессов и технических систем.

При представлении объекта этим классом систем задачи выбора целей и определения средств их достижения (элементов, связей) не разделяются. Проблемная ситуация может быть описана в виде выражений, связывающих цель со средствами (т.е. в виде критерия функционирования, критерия или показателя эффективности, целевой функции и т.п.), которые могут быть представлены уравнением, формулой, системой уравнений

Этот класс систем используется в тех случаях, когда может быть предложено детерминированное описание и экспериментально показана правомерность его применения, т.е. экспериментально доказана адекватность модели реальному объекту или процессу. Попытки применить этот класс систем для представления сложных

многокомпонентных объектов или многокритериальных задач, которые приходится решать при разработке технических комплексов, совершенствовании управления предприятиями и организациями и т.д., практически безрезультатны. Это требует недопустимо больших затрат времени на формирование модели, и, кроме того, как правило, не удается поставить эксперимент, доказывающий адекватность модели

При представлении объекта в виде плохо организованной, или диффузной, системы не ставится задача определить все компоненты и их связи с целями системы. Система характеризуется некоторым набором макропараметров и закономерностями, которые выявляются на основе исследования определенной с помощью некоторых правил достаточно представительной выборки компонентов, отображающих исследуемый объект или процесс.

На основе такого, выборочного, исследования получают характеристики или закономерности (статистические, экономические и т.п.), и распространяют эти закономерности на поведение системы в целом с какой-то вероятностью (статистической или в широком смысле использования этого термина)

Отображение объектов в виде диффузных систем находит широкое применение при определении пропускной способности систем разного рода, при определении численности штатов в обслуживающих, например ремонтных цехах предприятия, в обслуживающих учреждениях (для решения подобных задач применяют методы теории массового обслуживания) и т.д. При применении этого класса систем основной проблемой становится доказательство адекватности модели.

В случае статистических закономерностей адекватность определяется репрезентативностью выборки. Для экономических закономерностей способы доказательства адекватности не исследованы

Эта особенность приводит к необходимости сочетания формальных методов и методов качественного анализа. Поэтому основную идею отображения проектируемого объекта классом самоорганизующихся систем можно сформулировать следующим образом. Разрабатывается знаковая система, с помощью которой фиксируют известные на данный момент компоненты и связи, а затем путем преобразования полученного отображения с помощью выбранных или принятых подходов и методов (структуризации, или декомпозиции; композиции, поиска мер близости на пространстве состояний и т.п.) получают новые, неизвестные ранее компоненты, взаимоотношения, зависимости, которые могут либо послужить основой для принятия решений, либо подсказать последующие шаги на пути подготовки решения. Таким образом, можно накапливать информацию об объекте, фиксируя при этом все новые компоненты и связи (правила взаимодействия компонентов), и, применяя их, получать отображения последовательных состояний развивающейся системы, постепенно формируя все более адекватную модель реального, изучаемого или создаваемого объекта. При этом информация может поступать от специалистов различных областей знаний и накапливаться во времени по мере ее возникновения (в процессе познания объекта)

Отображение изучаемого объекта как системы этого класса позволяет исследовать наименее изученные объекты и процессы с большой неопределенностью на начальном этапе постановки задачи. Примерами таких задач являются задачи, возникающие при проектировании сложных технических комплексов, исследовании и разработке систем управления организациями.

Большинство из моделей и методик системного анализа основано на представлении объектов в виде самоорганизующихся систем, хотя не всегда это особо оговаривается. При формировании таких моделей меняется привычное представление о моделях, характерное для математического моделирования и прикладной математики. Изменяется представление и о доказательстве адекватности таких моделей. Адекватность модели доказывается как бы последовательно (по мере ее формирования) путем оценки

правильности отражения в каждой последующей модели компонентов и связей, необходимых для достижения поставленных целей.

При представлении объекта классом самоорганизующихся систем задачи определения целей и выбора средств, как правило, разделяются. При этом задачи определения целей, выбора средств, в свою очередь, могут быть описаны в виде самоорганизующихся систем, т.е. структуры основных направлений развития организации, структуры функциональной части АСУ, структуры обеспечивающей части АСУ, организационной структуры предприятия и т.д. следует также рассматривать как развивающиеся системы

В предложенной классификации систем использованы существовавшие к середине 70-х гг. XX в. термины, но они объединены в единую классификацию, в которой выделенные классы рассматриваются как подходы к отображению объекта или решению задачи и предлагается их характеристика, позволяющая выбирать класс систем для отображения объекта в зависимости от стадии его познания и возможности получения информации о нем.

Перечисленные признаки самоорганизующихся, или развивающихся, систем имеют разнообразные проявления, которые иногда можно выделять как самостоятельные особенности. Эти особенности, как правило, обусловлены наличием в системе активных элементов и носят двойственный характер: они являются новыми свойствами, полезными для существования системы, ее приспособлению к изменяющимся условиям среды, но в то же время вызывают неопределенность, затрудняют управление системой.

Мы не приводили подробных поясняющих примеров, поскольку каждый студент может легко обнаружить большинство из названных особенностей на примере своего собственного поведения или поведения своих друзей, коллектива, в котором учится.

Часть из рассмотренных особенностей характерна для диффузных систем (стохастичность поведения, нестабильность отдельных параметров), но большинство из них являются специфическими признаками, существенно отличающими этот класс систем от других и затрудняющими их моделирование.

В то же время при создании и организации управления предприятиями часто стремятся представить их, используя теорию автоматического регулирования и управления, разработывавшуюся для закрытых, технических систем и существенно искажающую понимание систем с активными элементами, что может нанести вред предприятию, сделать его неживым "механизмом", неспособным адаптироваться к среде и разрабатывать варианты своего развития.

По мере накопления опыта исследования и преобразования таких систем это наблюдение подтверждалось, и была осознана их основная особенность – принципиальная ограниченность формализованного описания развивающихся, самоорганизующихся систем.

Эта особенность, т.е. необходимость сочетания формальных методов и методов качественного анализа, и положена в основу большинства моделей и методик системного анализа. При формировании таких моделей меняется привычное представление о моделях, характерное для математического моделирования и прикладной математики. Изменяется представление и о доказательстве адекватности таких моделей.

Основную конструктивную идею моделирования при отображении объекта классом самоорганизующихся систем можно сформулировать следующим образом.

Разрабатывается знаковая система, с помощью которой фиксируют известные на данный момент компоненты и связи, а затем путем преобразования уже имеющегося отображения с помощью установленных (принятых) правил (правил структуризации или декомпозиции; правил композиции, поиска мер близости на пространстве состояний) получают новые, неизвестные ранее компоненты, взаимоотношения, зависимости,

которые могут либо послужить основой для принятия решений, либо подсказать последующие шаги на пути подготовки решения.

Таким образом, можно накапливать информацию об объекте, фиксируя при этом все новые компоненты и связи (правила взаимодействия компонент), и, применяя их, получать отображения последовательных состояний развивающейся системы, постепенно создавая все более адекватную модель реального, изучаемого или создаваемого объекта.

При этом информация может поступать от специалистов различных областей знаний и накапливаться во времени по мере ее возникновения (в процессе познания объекта).

Адекватность модели также доказывается как бы последовательно (по мере ее формирования) путем оценки правильности отражения в каждой последующей модели компонентов и связей, необходимых для достижения поставленных целей.

Иными словами, такое моделирование становится как бы своеобразным "механизмом" развития системы. Практическая реализация такого "механизма" связана с необходимостью разработки языка моделирования процесса принятия решения. В основу такого языка (знаковой системы) может быть положен один из методов моделирования систем (например, теоретико-множественные представления, математическая логика, математическая лингвистика, имитационное динамическое моделирование, информационный подход и т.д.), но по мере развития модели методы могут меняться.

При моделировании наиболее сложных процессов (например, процессов целеобразования, совершенствования организационных структур и т.п.) "механизм" развития (самоорганизации) может быть реализован в форме соответствующей методики системного анализа (примеры которых рассматриваются в прикладных главах учебника).

Рассматриваемый класс систем можно разбить на подклассы, выделив адаптивные или самоприспосабливающиеся системы, самообучающиеся системы, самовосстанавливающиеся, самовоспроизводящиеся и т.п. классы систем, в которых в различной степени реализуются рассмотренные выше и еще не изученные (например, для самовоспроизводящихся систем) особенности.

При представлении объекта классом самоорганизующихся систем задачи определения целей и выбора средств, как правило, разделяются. При этом задачи определения целей, в свою очередь, могут быть описаны в виде самоорганизующихся систем, т.е. структура основных направлений развития предприятия, плана, структура функциональной части АСУ и т.д.) должны развиваться (и даже здесь нужно чаще включать "механизм" развития), как и задачи выбора средств, разработки структуры обеспечивающей части АСУ, организационной структуры предприятия и т.д.

Большинство из рассматриваемых в последующих главах примеров методов, моделей и методик системного анализа основано на представлении объектов в виде самоорганизующихся систем, хотя не всегда это будет особо оговариваться.

Рассмотренные классы систем удобно использовать как подходы на начальном этапе моделирования любой задачи. Этим классам поставлены в соответствие методы формализованного представления систем и таким образом, определив класс системы, можно дать рекомендации по выбору метода, который позволит более адекватно ее отобразить.

#### **1.4. Свойства систем. Виды систем и их особенности**

(лекция)

Термин «система» употребляется в различных науках. Соответственно, разных ситуациях применяются различные определения системы: от философских до формальных.

Системы характеризуются рядом свойств, основные из которых делятся на три группы: статические, динамические и синтетические.

Статические свойства систем

Статическими свойствами называются особенности некоторого состояния системы. Это то чем обладает система в любой фиксированный момент времени.

**Целостность.** Всякая система выступает как нечто единое, целое, обособленное, отличающееся от всего остального. Это свойство называется целостностью системы. Оно позволяет разделить весь мир на две части: систему и окружающую среду.

**Открытость.** Выделяемая, отличающаяся от всего остального система не изолирована от окружающей среды. Наоборот, они связаны и обмениваются различными видами ресурсов (веществом, энергией, информацией и т.д.). Эта особенность обозначается термином «открытость».

Связи системы со средой носят направленный характер: по одним среда влияет на систему (входы системы), по другим система оказывает влияние на среду, что-то делает в среде, что-то выдаёт в среду (выходы системы). Описание входов и выходов системы называется моделью чёрного ящика. В такой модели отсутствует информация о внутренних особенностях системы. Несмотря на кажущуюся простоту, такой модели зачастую вполне достаточно для работы с системой.

Во многих случаях при управлении техникой или людьми информация только о входах и выходах системы позволяет успешно достигать цели. Однако для этого модель должна отвечать определённым требованиям. Например, пользователь может испытывать затруднения, если не будет знать, что в некоторых моделях телевизоров кнопку включения нужно не нажимать, а вытягивать. Поэтому для успешного управления модель должна содержать всю информацию, необходимую для достижения цели. При попытке удовлетворить это требование может возникнуть четыре типа ошибок, которые происходят из того, что модель всегда содержит конечное число связей, тогда как у реальной системы количество связей неограниченно.

Ошибка первого рода возникает в том случае, когда субъект ошибочно рассматривает связь как существенную и принимает решение о её включении в модель. Это приводит к появлению в модели лишних, ненужных элементов. Ошибка второго рода, напротив, совершается тогда, когда принимается решение об исключении из модели якобы несущественной связи, без которой, на самом деле, достижение цели затруднено или вообще невозможно.

Ответ на вопрос о том, какая из ошибок хуже, зависит от контекста, в котором он задаётся. Понятно, что использование модели, содержащей ошибку, неизбежно ведёт к потерям. Потери могут быть небольшими, приемлемыми, нетерпимыми и недопустимыми. Урон, наносимый ошибкой первого рода связан с тем, что информация, внесённая ею, лишняя. При работе с такой моделью придётся тратить ресурсы на фиксацию и обработку лишней информации, например, тратить на неё память ЭВМ и время обработки. На качестве решения это, возможно, и не скажется, а на стоимости и своевременности скажется обязательно. Потери от ошибки второго рода – урон от того, что информации для полного достижения цели не хватит, цель не может быть достигнута в полной мере.

Теперь ясно, что хуже та ошибка, потери от которой больше, а это зависит от конкретных обстоятельств. Например, если время является критическим фактором, то ошибка первого рода становится гораздо более опасной, чем ошибка второго рода: вовремя принятое, пусть не наилучшее, решение предпочтительнее оптимального, но запоздавшего.

Ошибкой третьего рода принято считать последствия незнания. Для того, чтобы оценивать существенность некоторой связи, нужно знать, что она вообще есть. Если это не известно, то вопрос о включении связи в модель вообще не стоит. В том случае, если такая связь несущественна, то на практике её наличие в реальности и отсутствие в модели будет незаметно. Если же связь существенна, то возникнут трудности, аналогичные

трудностям при ошибке второго рода. Разница состоит в том, что ошибку третьего рода сложнее исправить: для этого необходимо добывать новые знания.

Ошибка четвёртого рода возникает при ошибочном отнесении известной существенной связи к числу входов или выходов системы. Например, точно установлено, что в Англии 19-го века здоровье мужчин, носящих цилиндры, значительно превосходило здоровье мужчин, носящих кепки. Наверяд ли из этого следует, что вид головного убора можно рассматривать как вход для системы прогнозирования состояния здоровья.

Внутренняя неоднородность систем, раличимость частей. Если заглянуть внутрь «чёрного ящика», то выяснится, что система неоднородна, не монолитна. Можно обнаружить, что различные качества в разных частях системы отличаются. Описание внутренней неоднородности системы сводится к обособлению относительно однородных участков, проведению границ между ними. Так появляется понятие о частях системы. При более детальном рассмотрении оказывается, что выделенные крупные части тоже неоднородны, что требует выделять ещё более мелкие части. В результате получается иерархическое описание частей системы, которое называется моделью состава.

Информация о составе системы может использоваться для работы с системой. Цели взаимодействия с системой могут быть различными, в связи с чем могут различаться и модели состава одной и той же системы. На первый взгляд различить части системы нетрудно, они «бросаются в глаза». В некоторых системах части возникают произвольно, в процессе естественного роста и развития (организмы, социумы и т.д.). Искусственные системы заведомо собираются из заранее известных частей (механизмы, здания и т.д.). Есть и смешанные типы систем, такие как заповедники, сельскохозяйственные системы. С другой стороны, с точки зрения ректора, студента, бухгалтера и хозяйственника университет состоит из разных частей. Самолёт состоит из разных частей с точки зрения пилота, стюардессы, пассажира. Трудности создания модели состава можно представить тремя положениями.

Во-первых, целое можно делить на часть по-разному. При этом способ деления определяется поставленной целью. Например, состав автомобиля по-разному представляют начинающим автолюбителям, будущим профессиональным водителям, слесарям, готовящимся к работе в автосервисе, продавцам в автомагазинах. Естественно задать вопрос о том, существуют ли части системы «на самом деле»? Ответ содержится в формулировке рассматриваемого свойства: речь идёт о различимости, а не о разделимости частей. Можно различать нужные для достижения цели части системы, но нельзя разделять их.

Во-вторых, количество частей в модели состава зависит и от того, на каком уровне остановить дробление системы. Части на конечных ветвях получающегося иерархического дерева называются элементами. В различных обстоятельствах прекращение декомпозиции производится на разных уровнях. Например, при описании предстоящих работ приходится давать опытному работнику и новичку инструкции разной степени подробности. Таким образом, модель состава зависит от того, что считать элементарным. Встречаются случаи, когда элемент имеет природный, абсолютный характер (клетка, индивид, фонема, электрон).

В-третьих, любая система является частью большей системы, а иногда и нескольких систем сразу. Такую метасистему также можно делить на подсистемы по-разному. Это означает, что внешняя граница системы имеет относительный, условный характер. Определение границ системы производится с учётом целей субъекта, который будет использовать модель системы.

#### Динамические свойства систем

Если рассмотреть состояние системы в новый момент времени, то вновь можно обнаружить все четыре статических свойства. Но если наложить «фотографии» системы в разные моменты времени друг на друга, то обнаружится, что они отличаются в деталях: за

время между двумя моментами наблюдения произошли какие-то изменения в системе и её окружении. Такие изменения могут быть важными при работе с системой, и, следовательно, должны быть отображены в описаниях системы и учтены при работе с ней. Особенности изменений со временем внутри системы и вне её и называются динамическими свойствами системы. Обычно различают четыре динамических свойства системы.

**Функциональность.** Процессы  $Y(t)$ , происходящие на выходах системы, рассматриваются как её функции. Функции системы – это её поведение во внешней среде, результаты её деятельности, продукция, производимая системой.

Из множественности выходов вытекает множественность функций, каждая из которых может быть кем-то и для чего-то использована. Поэтому одна и та же система может служить для разных целей. Субъект, использующий систему в своих целях, будет, естественно, оценивать её функции и упорядочивать их по отношению к своим потребностям. Так появляются понятия главной, второстепенной, нейтральной, нежелательной, лишней функции и т.д.

**Стимулируемость.** На входах системы также происходят определённые процессы  $X(t)$ , воздействующие на систему и превращающиеся после ряда преобразований в системе в  $Y(t)$ . Воздействия  $X(t)$  называются стимулами, а сама подверженность любой системы воздействию извне и изменение её поведения под этими воздействиями – стимулируемость.

**Изменчивость системы со временем.** В любой системе происходят изменения, которые необходимо учитывать. В терминах модели системы можно сказать, что изменяться могут значения внутренних переменных (параметров)  $Z(t)$ , состав и структура системы и любые их комбинации. Характер этих изменений тоже может быть различным. Поэтому могут рассматриваться дальнейшие классификации изменений.

Самая очевидная классификация – по скорости изменений (медленные, быстрые). Скорость изменений измеряется относительно какой-либо скорости, взятой за стандарт. Возможно введение большого количества градаций скоростей. Возможна также классификация тенденций перемен в системе, касающихся её структуры и состава.

Можно говорить о таких изменениях, которые не затрагивают структуры системы: одни элементы заменяются другим, эквивалентными; параметры  $Z(t)$  могут меняться без изменения структуры. Такой тип динамики системы называют её функционированием. Изменения могут носить количественный характер: происходит наращивание состава системы, и хотя при этом автоматически меняется и её структура, это до некоторого момента не сказывается на свойствах системы (например, расширение мусорной свалки). Такие изменения называются ростом системы. При качественных изменениях системы происходит изменение её существенных свойств. Если такие изменения идут в позитивном направлении, они называются развитием. С теми же ресурсами развитая система добивается более высоких результатов, могут появиться новые позитивные качества (функции). Это связано с повышением уровня системности, организованности системы.

Можно использовать и другие классификации процессов, происходящих в системе: по предсказуемости процессы делятся на случайные и детерминированные; по типу зависимости от времени процессы делятся на монотонные, периодические, гармонические, импульсные и т.д.

**Существование в изменяющейся среде.** Изменяется не только данная система, но и все остальные. Для рассматриваемой системы это выглядит как непрерывное изменение окружающей среды. Это обстоятельство имеет множество последствий для самой системы, которая должна приспосабливаться к новым условиям для того, чтобы не погибнуть. При рассмотрении конкретной системы обычно уделяют внимание особенностям той или иной реакции системы, например, скорости реакции. Если

рассматривать системы, хранящие информацию (книги, магнитные носители), то скорость реакции на изменения внешней среды должна быть минимальной для обеспечения сохранения информации. С другой стороны, скорость реакции системы управления должна во много раз превосходить скорость изменения окружающей среды, так как система должна выбрать управляющее воздействие ещё до того, как состояние окружающей среды необратимо изменится.

К синтетическим свойствам относятся обобщающие, интегральные, собирательные свойства, описывающие взаимодействия системы со средой и учитывающие целостность в самом общем понимании.

Эмерджентность. Объединение элементов в систему приводит к появлению качественно новых свойств, не выводящихся из свойств частей, присущих только самой системе и существующих только до тех пор, пока система составляет одно целое. Подобные качества системы называются

эмерджентными (от англ. «возникать»).

Примеры эмерджентных свойств можно найти в различных областях. Например, ни одна из частей самолёта летать не может, а самолёт, тем не менее, летает. Свойства воды, многие из которых до конца не изучены, не вытекают из свойств водорода и кислорода.

Пусть имеются два чёрных ящика, каждый из которых обладает одним входом, одним выходом и производит одну операцию - к числу на входе прибавляет единицу. При соединении таких элементов по схеме, приведённой на рисунке, получим систему без входов, но с двумя выходами. На каждом такте работы система будет выдавать большее число, при этом на одном входе будут появляться только чётные, а на другом – только нечётные числа.

Эмерджентные свойства системы определяются её структурой. Это значит, что при различных соединениях элементов будут возникать различные эмерджентные свойства. Например, если соединить элементы параллельно, то функционально новая система не будет отличаться от одного элемента. Эмерджентность проявится в повышении надёжности системы за счёт параллельного соединения двух одинаковых элементов – то есть за счёт избыточности.

Следует отметить важный случай, когда элементы системы обладают всеми её свойствами. Такая ситуация характерна для фрактального построения системы. При этом принципы структурирования частей те же, что и у системы в целом. Примером фрактальной системы может служить организация, в которой управление построено тождественно на всех уровнях иерархии.

Неразделимость на части. Это свойство является, фактически, следствием эмерджентности. Оно подчёркивается особо из-за того, что его практическая важность велика, а недооценка встречается очень часто.

При изъятии из системы части происходит два важных события. Во-первых, при этом изменяется состав системы, а значит и её структура. Это будет уже другая система с отличающимися свойствами. Во-вторых, элемент, изъятый из системы, будет вести себя по другому в силу того, что изменится его окружение. Всё это говорит о том, при рассмотрении элемента отдельно от остальной системы следует соблюдать осторожность.

Ингерентность. Систем тем более ингерентна (от англ. *inherent* – «являющийся частью чего-либо»), чем лучше она согласована, приспособлена к окружающей среде, совместима с нею. Степень ингерентности бывает разной и может изменяться. Целесообразность рассмотрения ингерентности как одного из свойств системы связана с тем, что от неё зависят степень и качество осуществления системой избранной функции. В естественных системах ингерентность повышается путём естественного отбора. В искусственных системах ингерентность должна быть

Целесообразность. В создаваемых человеком системах подчинённость и структуры, и состава достижению поставленной цели настолько очевидна, что может быть признана

фундаментальным свойством любой искусственной системы. Это свойство называется целесообразностью. Цель, ради которой создаётся система, определяет, какое эмерджентное свойство будет обеспечивать достижение цели, а это, в свою очередь, диктует выбор структуры и состава системы. Для того, чтобы распространить понятие целесообразности и на естественные системы, необходимо уточнить понятие цели. Уточнение проводится на примере искусственной системы.

История любой искусственной системы начинается в некоторый момент времени 0, когда существующее значение вектора состояния  $Y_0$  оказывается неудовлетворительным, то есть возникает проблемная ситуация. Субъект недоволен этим состоянием и хотел бы его изменить. Пусть его удовлетворило бы значения вектора состояния  $Y^*$ . Это есть первое определение цели. Далее обнаруживается, что  $Y^*$  не существует сейчас и не может в силу ряда причин быть достигнутым в ближайшем будущем. Второй шаг в определении цели состоит в признании её желательным будущим состоянием. Тут же выясняется, что будущее не ограничено. Третий шаг в уточнении понятия цели состоит в оценке времени  $T^*$ , когда желаемое состояние  $Y^*$  может быть достигнуто в заданных условиях. Теперь цель становится двумерной, это точка  $(T^*, Y^*)$  на графике. Задача состоит в том, чтобы перейти из точки  $(0, Y_0)$  в точку  $(T^*, Y^*)$ . Но оказывается, что пройти этот путь можно по разным траекториям, а реализована может быть только одна из них. Пусть выбор выпал на траекторию  $Y^*(t)$ . Таким образом, под целью теперь понимается не только конечное состояние  $(T^*, Y^*)$ , но и вся траектория  $Y^*(t)$  («промежуточные цели», «план»). Итак, цель есть желаемые будущие состояния  $Y^*(t)$ .

По прошествии времени  $T^*$  состояние  $Y^*$  становится реальным. Поэтому появляется возможность определить цель как будущее реальное состояние. Это даёт возможность сказать, что свойством целесообразности обладают и естественные системы, что позволяет с единых позиций подходить к описанию систем любой природы. Основное же различие между естественными и искусственными системами состоит в том, что естественные системы, подчиняясь законам природы, реализуют объективные цели, а искусственные системы создаются для реализации субъективных целей.

### **1.5. Декомпозиция систем. Анализ систем** (практическое занятие)

Декомпозиция (детализация, разбиение на составляющие элементы) как способ системного анализа используется для структуризации целей, проблем, противоречий, стратегий, решений и ряда других задач функционально-структурного подхода к анализу существующих систем или синтезу новых систем. Внешней формой декомпозиции могут быть граф-схемы, т.н. «деревья» целей, проблем, противоречий, стратегий, решений.

«Деревья» в целеполагании

Анализ процессов формулирования глобальной цели в сложной системе показывает, что эта цель возникает в сознании руководителя или коллектива как некоторая, достаточно «размытая» область. На любом уровне цель возникает вначале в виде «образа» цели. При этом достичь одинакового понимания общей цели всеми исполнителями, по-видимому, принципиально невозможно без ее легализации в виде упорядоченного или неупорядоченного набора взаимосвязанных подцелей, которые делают ее понятной и более конкретной для разных исполнителей. Таким образом, задача формулирования общей цели в сложных системах должна быть сведена к задаче структуризации цели. Для облегчения задачи целеполагания применяется декомпозиция (детализация) цели в виде неупорядоченного или упорядоченного набора взаимосвязанных подцелей (структуризация); которые делают ее более конкретной и понятной для всех участников процесса целеобразования. Для наименования подцелей в конкретных приложениях используют разные названия: направления, программы, задачи, а начиная с некоторого уровня - функции.

Поскольку любая цель обладает двойственностью, являясь одновременно и целью, и средством для достижения вышестоящей цели, то описание отношений между целями и средствами может быть отражено специальной схемой (графом), носящей название «дерево целей». Термин был введен в 1957 г. У. Черчменом, который предложил метод дерева целей в связи с проблемами принятия решений в промышленности. Эта схема была с успехом использована в ряде крупных военных и промышленных программ в США, а в настоящее время является повседневным инструментом практически любого современного менеджера.

При использовании метода «дерево целей» в качестве средства принятия решений часто применяют термин «дерево решений». При применении метода для выявления и уточнения функций системы управления говорят о «дереве целей и функций». При структуризации тематики научно-исследовательской организации пользуются термином «дерево проблемы», а при разработке прогнозов «дерево направлений развития (прогнозирования развития)» или «прогнозный граф».

Для системного анализа организаций с целью их реорганизации или автоматизации можно предложить следующие виды «деревьев»:

- а) «дерево целей» объекта, которое можно определить как «дерево желаний»;
- б) «дерево проблем» объекта;
- в) «дерево целей» субъекта;
- г) «дерево стратегий» или «дерево решений».

Первоначально строится «дерево целей» с позиции объекта, т. е. «дерево желаний». В нем отражаются главные желания, как правило, связанные с существованием и развитием объекта. Далее они декомпозируются на более детальные цели, удовлетворение которых приведет к удовлетворению главных.

На следующем этапе анализируется проблемность удовлетворения потребностей и желаний объекта и выделяется ключевая проблема (проблемы), которая декомпозируется в виде «дерева проблем».

Далее строится «дерево целей» с позиции субъекта как позитивное отражение «дерева проблем».

И, наконец, строится «дерево стратегий», в котором «дерево целей» дополняется вариантами (стратегиями) решения выявленных проблем.

До окончательной формулировки целей необходимо решить два вопроса. Во-первых, рассмотреть проблематику — множество проблем, которые порождаются решением наших проблем. Это может потребовать корректировки намеченных целей. Во-вторых, необходим аналитический, а чаще всего экспертный анализ для выбора альтернатив решения проблем.

После выбора стратегий формулируются задачи (функции) и назначаются их исполнители.

Построение «дерева целей»

Сначала формируется основная цель (желание), формулировка которой, как правило, имеет следующую структуру: глагол-действие, пояснение, объект-цель. Построение «дерева целей» начинается с процедуры структуризации, расчленения основной цели на составные элементы, называемые подцелями, каждая из которых является средством, направлением или этапом ее достижения. Затем каждая из подцелей в свою очередь рассматривается как цель и расчленяется на компоненты. Если все эти элементы представить графически, то получится так называемое «дерево целей», обращенное кроной вниз. Деление прекращается, когда подцель становится неделимой и объективно измеримой.

Построение «дерева» происходит по следующим принципам:

- если очередная подцель является средством для предыдущей, то она опускается на уровень ниже первой;

- если она является целью, то поднимается на один уровень вверх;
- если она не является ни целью, ни средством, то остается на том же уровне иерархии.

Для проверки полноты и внутренней непротиворечивости дерева целей существуют четыре простых правила.

1. При чтении сверху вниз подцель должна отвечать на вопрос: что нужно сделать, чтобы реализовать цель предыдущего уровня?

2. При чтении снизу вверх цель более высокого уровня должна отвечать на вопрос: для чего необходима цель, лежащая непосредственно под ней?

3. При чтении подцелей, необходимых для достижения одной цели, следует уточнить, все ли подцели действительно необходимы для ее достижения.

4. При чтении подцелей, необходимых для достижения одной цели, следует уточнить, какие еще подцели этого уровня необходимы для достижения цели.

В качестве удобного и апробированного на практике инструмента исследования целей можно использовать построение целевой модели в виде древовидного графа – «дерева» целей.

Построение «дерева» целей осуществляется для формализованного отображения процесса распределения целей по уровням управления. Посредством дерева целей описывается их состав, взаимосвязь, упорядоченная иерархия, для чего осуществляется последовательная декомпозиция главной цели на подцели по следующим правилам:

- общая цель, находящаяся в вершине графа, должна содержать описание конечного результата;

- при развертывании общей цели в иерархическую структуру целей исходят из условия: реализация подцелей каждого последующего уровня является необходимым и достаточным условием достижения цели предыдущего уровня;

- при формулировке целей разных уровней необходимо описывать желаемые результаты, но не способы их получения;

- подцели каждого уровня должны быть независимы друг от друга и невыводимы друг из друга;

- фундамент дерева целей должны составлять задачи, представляющие собой формулировку работ, которые могут быть выполнены определенным способом и в заранее установленные сроки.

Надо выделить основную функцию и функции уровней.

Дерево противоречий системы - отражает противоречия отдельных уровней функционально-структурной ее организации. На каждом уровне существуют противоречия между функциями и структурной организацией, как противоречия между содержанием и формой, между состоянием определенного качества и сложностью структуры.

Многоуровневая иерархическая система противоречий и есть дерево противоречий системы.

Функциональные модули сложной системы формируют ее концепцию в соответствии с деревом функций и деревом противоречий системы.

Конструктивные модули - определяют и организуют т.н. морфологическую структуру системы на основе ее функциональных модулей.

Связь между функциональными и конструктивными модулями проявляется, как между функцией и структурой. Иными словами - система с определенными функциональными модулями может быть реализована неоднозначно с помощью различных конструктивных модулей.

Алгоритм функционально-структурного подхода к анализу существующей системы или синтезу новой системы.

Алгоритм сводится к последовательности операций:

1. Анализ систем - прототипов включает: выяснение основных и дополнительных функций; построение обобщенного дерева функций; выявление базовых структур; анализ принципов технической реализации.

2. Исследование дерева противоречий системы включает: анализ «узких мест» систем-прототипов; выявление ограничивающих факторов; выявление основного противоречия системы; построение дерева противоречий системы, анализ дерева противоречий системы.

3. Формирование концепций системы включает: влияние способов преодоления противоречий системы; поиск альтернатив технической реализации системы; разработку технического задания на систему; определение совокупности показателей качества системы.

4. Формирование дерева функций системы включает: определение множества основных и дополнительных функций; определение числа уровней декомпозиции и декомпозицию функций системы; выявление набора типовых операторов; отображение функций предыдущего уровня на множество операторов; трансформацию дерева функций.

5. Формирование функциональной структуры системы включает: анализ методов аппаратной и программной реализации; разработку алгоритмов функционирования системы; анализ связей операторами различных уровней; построение временных диаграмм активности операторов соответствующего уровня; определение загрузки ресурсов подсистемы; эквивалентные преобразования операторов; структур; выделение типовых функциональных подсистем.

6. Формирование морфологической структуры системы на основе конструктивных модулей включает:

- выбор технических средств для реализации системы;
- формирование таблиц соответствия функциональных модулей;
- формирование таблиц соответствия конструктивных модулей;
- покрытие функциональных подсистем конструктивным модулями;
- формирование конструктивных модулей высокого уровня;
- формирование альтернативных вариантов системы;
- анализ достоинств функционирования системы.

7. Оценка показателей качества и выбор окончательного варианта системы включает:

- выбор стратегии сравнительного анализа вариантов системы;
- выбор методики оценки показателей качества системы;
- анализ показателей качества системы;
- формирование документации на систему.

К этому необходимо добавить, что если полученные результаты неудовлетворительны, то необходим возврат к повторению этого алгоритма на новом витке развития (активного поиска).

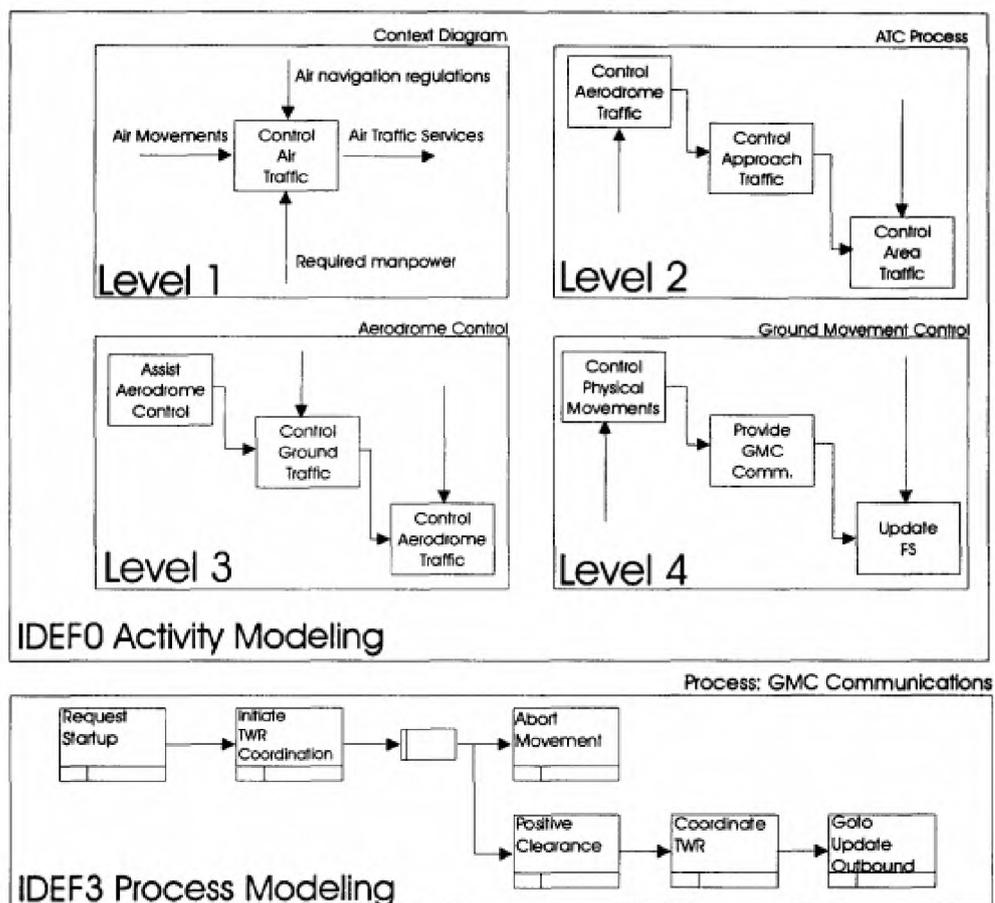
IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) – нотация описания бизнес-процессов. Основана на методологии SADT.

SADT (Structured Analysis and Design Technique, технология структурного анализа и проектирования) - графические обозначения и подход к описанию систем. Разработка SADT началась в 1969 году и была опробована на практике в компаниях различных отраслей (аэрокосмическая отрасль, телефония и т.д.). Публично появилась на рынке в 1975 г и получила очень широкое распространение в мире.

IDEF0 является результатом программы компьютеризации промышленности, которая была предложена ВВС США. Автоматизация деятельности предприятий потребовала соответствующих методик и инструментов. Перед тем, как разрабатывать программное обеспечение, необходимо было четко и понятно описать бизнес-процессы

(нельзя автоматизировать хаос). Инструменты, разработанные для задач программирования, так же могут быть полезны и для задач менеджмента. Нотация может быть использована для моделирования широкого круга автоматизированных и неавтоматизированных систем.

Идея IDEF0 лежит в том, что бизнес-процесс отображается в виде прямоугольника, в которой входят и выходят стрелки.



Для IDEF0 имеет значение сторона процесса и связанная с ней стрелка:

- слева входящая стрелка – вход бизнес-процесса – информация (документ) или ТМЦ, который будет преобразован в ходе выполнения процесса;

- справа исходящая стрелка – выход бизнес-процесса – преобразованная информация (документ) или ТМЦ;

- сверху входящая стрелка – управление бизнес-процесса – информация или документ, который определяет как должен выполняться бизнес-процесс, как должно происходить преобразование входа в выход;

- снизу входящая стрелка – механизм бизнес-процесса – то, что преобразовывает вход в выход: сотрудники или техника. Считается, что за один цикл процесса не происходит изменения механизма.

В концепцию создаваемой системы желательно закладывать такие прогрессивные идеи, которые обеспечивали бы повышение ее эффективности в несколько раз, т.е. создать запас, резерв возможностей. Тогда при решении последующих вопросов низкого уровня можно «пожертвовать» несколькими процентами из этого резерва эффективности, чтобы быстрее и с меньшими затратами осуществить практическую доводку и внедрение системы.

**Практическое задание:**

Вариант 1 Система должна описывать порядок подготовки к экзамену, предполагающий получение отличной оценки.

Вариант 2 Система должна описывать порядок выполнения практической работы по дисциплине «Проектирование ИС».

Вариант 3 Система должна описывать порядок получения водительских прав.

Вариант 4 Система должна описывать порядок организации городского спортивного соревнования.

Вариант 5 Система должна описывать порядок организации общеинститутского студенческого мероприятия.

Вариант 6 Система составления учебного графика дисциплин, изучаемых на факультете

Вариант 7 Система должна описывать порядок поставок товара в систему розничных киосков.

Вариант 8 Система должна описывать порядок обработки заказов в службе быта.  
Вариант

9 Система должна описывать работу одного из участков автосалона .

Вариант 10 Система должна описывать работу приемного покоя в больнице.

## МОДУЛЬ 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### 2.1. Формирование требований к системе управления

(лекция)

Создание АСУ ТП осуществляется поэтапно, от постановки задачи до пусконаладочных работ. Процесс создания АСУ ТП можно разбить на стадии:

#### 1. Стадия "Формирование требований к АСУ ТП"

Этапы:

1.1 Обследование объекта и обоснование необходимости создания АСУ ТП;

1.2 Формирование требований Заказчика к АСУ ТП;

1.3 Оформление Отчета о выполненной работе, и Заявки на разработку АСУ ТП.

В результате выполнения данной стадии оформляются:

Отчет по ГОСТ 7.32-2001 "Отчет о научно-технической работе";

Заявка на разработку АСУ ТП.

Основная часть отчета содержит следующие разделы:

Характеристика объекта и результатов его функционирования;

Описание существующих средств автоматизации, и информационно-управляющей системы;

Описание недостатков существующих средств автоматизации и информационно-управляющей системы

Описание требований к средствам измерений автоматизируемого технологического процесса;

Обоснование необходимости совершенствования существующих средств автоматизации и информационно-управляющей системы объекта;

Цели, критерии и ограничения создания АСУ ТП;

Функции и задачи создаваемой АСУ ТП;

Ожидаемые технико-экономические результаты создания АСУ ТП;

Выводы и предложения.

Рекомендуется следующее содержание разделов:

В разделе "Характеристика объекта и результатов его функционирования" описывают задачи развития, требования к объему, номенклатуре и качеству результатов функционирования, а также характер взаимодействия объекта с внешней средой. При определении фактических показателей определяют тенденции их изменения во времени.

Раздел "Описание существующих средств автоматизации и информационно-управляющей системы" содержит описание функциональной и информационной структуры системы, качественных и количественных характеристик, раскрывающих взаимодействие ее компонентов в процессе функционирования.

В разделе "Описание недостатков существующих средств автоматизации и информационно-управляющей системы" приводят результаты диагностического анализа, при котором оценивают качество функционирования и организационно-технический уровень системы, выявляют недостатки в организации информационных и управляющих процессов, и определяют степень их влияния на качество функционирования системы.

В разделе "Описание требований к средствам измерений автоматизируемого технологического процесса" необходимо определить:

Какие измерения следует проводить и с какой точностью;

Дать рекомендации по выбору соответствующего контрольного, измерительного и испытательного оборудования, способного обеспечить необходимую точность и сходимости измерений.

В разделе "Обоснование необходимости совершенствования существующих средств автоматизации и информационно-управляющей системы объекта" при анализе соответствия показателей функционирования объекта предъявляемым требованиям оценивают степень соответствия прогнозируемых показателей и требуемых, и выявляют необходимость совершенствования информационно-управляющей системы путем создания АСУТП (согласие есть продукт при полном непротивлении сторон — красиво излагают).

Раздел "Цели, критерии и ограничения создания АСУТП" содержит:

Формулировку производственно-хозяйственных, научно-технических и экономических целей и критериев создания АСУТП;

Характеристику ограничений по созданию АСУТП.

Раздел "Функции и задачи создаваемой АСУТП" содержит:

- Обоснование выбора перечня автоматизированных функций и комплексов задач с указанием очередности внедрения;

- Требования к характеристикам реализации функций и задач в соответствии с действующими нормативно-техническими документами, определяющими общие технические требования к АСУТП конкретного вида;

- Дополнительные требования, учитывающие специфику АСУТП.

Раздел "Ожидаемые технико-экономические результаты создания АСУТП" содержит:

Определение всех трех источников, трех составных частей экономической эффективности, получаемых в результате создания АСУТП (экономия производственных ресурсов, улучшение качества продукции, повышение производительности труда), и оценку ожидаемых изменений основных технико-экономических и социальных показателей производственно-хозяйственной деятельности объекта. Например, показателей по номенклатуре и объему производства, себестоимости продукции, рентабельности, отчислениям в фонды экономического стимулирования;

Оценку ожидаемых затрат на создание и эксплуатацию АСУТП с распределением их по очередям создания АСУТП и с разбивкой по годам;

Ожидаемые обобщающие показатели экономической эффективности АСУТП.

Раздел "Выводы и предложения" рекомендуется разделять на подразделы:

Подраздел "Выводы о производственно-хозяйственной необходимости и технико-экономической целесообразности создания АСУТП" содержит:

Сопоставление ожидаемых результатов создания АСУТП с заданными целями и критериями создания АСУТП (по целевым показателям и нормативным требованиям);

Принципиальное решение вопроса о создании АСУТП (положительное или отрицательное, то есть погодить).

Подраздел "Предложения по совершенствованию организации и технологии процесса деятельности" содержит предложения по совершенствованию:

Производственно-хозяйственной деятельности;

Организационной и функциональной структуры системы;

Методов деятельности;

Видов обеспечения АСУТП.

Подраздел "Рекомендации по созданию АСУТП" содержит рекомендации:

По виду создаваемой АСУТП и ее совместимости с другими АСУТП;

По организационной и функциональной структуре создаваемой АСУТП;

По составу и характеристикам подсистем и видов обеспечения АСУТП;

По организации использования имеющихся, и по приобретению дополнительных средств вычислительной техники;

По рациональной организации разработки и внедрения АСУТП;

Поопределениюосновных и дополнительных, внешних и внутренних источников, видов и объемов финансирования и материального обеспечения разработки АСУТП;  
По обеспечению производственных условий создания АСУТП;  
Другие рекомендации по созданию АСУТП.

Заявка на разработку АСУТП составляется Заказчиком в произвольной форме и содержит:

Предложения организации-заказчика к организации-разработчику на проведение работ по созданию АСУТП;

Требования Заказчика к Системе;

Условия и ресурсы на создание АСУТП.

2. Стадия "Разработка концепции АСУ ТП"

Этапы:

2.1 Изучение объекта автоматизации;

2.2 Проведение необходимых научно-исследовательских работ;

2.3 Разработка вариантов концепции АСУ ТП и выбор варианта концепции АСУ ТП в соответствии с требованиями Заказчика.

3. Стадия "Техническое задание"

Разработка и утверждение Технического задания на создание АСУ ТП.

4. Стадия "Эскизный проект"

Этапы:

4.1 Разработка предварительных проектных решений по системе и ее частям;

4.2 Разработка документации на АСУ ТП и ее части.

5. Стадия "Технический проект"

Этапы:

5.1 Разработка проектных решений по Системе и ее частям;

5.2 Разработка документации на АСУ ТП и ее части;

5.3 Разработка и оформление документации на поставку изделий для комплектования АСУ ТП и технических требований (технических заданий) на их разработку;

5.4 Разработка заданий на проектирование в смежных частях проекта.

6. Стадия "Рабочий проект (Рабочая документация)"

Этапы:

6.1 Разработка рабочей документации на АСУ ТП и ее части;

6.2 Разработка и конфигурация программного обеспечения.

7. Стадия "Ввод в действие"

Этапы:

7.1 Подготовка объекта автоматизации к вводу АСУ ТП в действие;

7.2 Подготовка персонала;

7.3 Комплектация АСУ ТП поставляемыми изделиями (программными и техническими средствами, программно-техническими комплексами, информационными изделиями);

7.4 Строительно-монтажные работы;

7.5 Пусконаладочные работы;

7.6 Проведение Предварительных испытаний;

7.7 Проведение Опытной эксплуатации;

7.8 Проведение Приемочных испытаний.

8. Стадия "Сопровождение АСУ ТП"

Этапы:

8.1 Выполнение работ в соответствии с гарантийными обязательствами;

8.2 Послегарантийное обслуживание.

Требования к структуре и функционированию Системы.

По функциональным признакам структура АСУТП подразделяется на следующие категории:

Распределенная система управления (в дальнейшем РСУ), базирующаяся на специализированной микропроцессорной технике, предназначенной для управления технологическим процессом совместно с оперативным персоналом в режиме реального времени, и предоставления информации в виде технологических данных, трендов, отчетов в заводскую ЛВС - директору завода, главному инженеру, диспетчеру, главным специалистами, начальникам технологических цехов;

Система противоаварийной защиты (в дальнейшем ПАЗ), базирующаяся на специализированной микропроцессорной технике повышенной надежности, предназначенной для предотвращения аварийных ситуаций, и автоматического перевода технологического процесса в безопасное состояние при возникновении предаварийных ситуаций;

Периферийное оборудование - понятие, объединяющее датчики, анализаторы, преобразователи и исполнительные механизмы, а также электрические и другие приводы, установленные как непосредственно на технологическом оборудовании, так и в специальных помещениях, и подключенные к РСУ и ПАЗ. АСУТП должна быть ориентирована на работу в жестком реальном времени, и быть предсказуемой, то есть обеспечивать выполнение всех функций с заданной периодичностью и точно в назначенный срок.

Должна быть обеспечена надежная защита АСУТП:

От несанкционированного доступа;

От разрушения или останова работы программного обеспечения в результате некорректных действий оператора технологического процесса;

От проникновения в Систему вирусов.

Должна быть обеспечена возможность полного исключения на использование станции оператора в качестве персонального компьютера для непроизводственных целей, выходящих за рамки инструкций технолога-оператора.

Для удобства восприятия информации и выработки соответствующих стереотипов у технолога-оператора, вся технологическая информация должна быть организована иерархически, воспроизводя организационную структуру производства в естественной для технологического персонала форме:

Производство / Цех

Отделение

Технологический узел

Контур (параметр).

Должна быть возможность управления технологическим процессом с любого рабочего места оператора-технолога в данном помещении управления - операторной.

В составе программного обеспечения Системы должен быть набор программных модулей - функциональных блоков, позволяющих осуществлять контроль и управление технологическими объектами различных классов. Система должна иметь возможность оперативного конфигурирования прикладного программного обеспечения на отдельной инженерной станции без нарушения работоспособности Системы.

Конфигурирование и настройка Системы под конкретный объект управления должна производиться в человеко-машинной интерактивной среде, обученными работе с Системой специалистами. АСУТП должна иметь гибкую структуру, обеспечивать модификацию алгоритмов решения задач и наборов участвующих в них переменных, конфигурирование схем регулирования и управления.

Работа распределенной системы управления не должна влиять на работу системы противоаварийной защиты - как в нормальном режиме работы, так и в случае нарушения своей работоспособности.

В Системе должны иметься аппаратные и аппаратно-программные средства диагностики сетей, станций, блоков и модулей.

Пуск и останов технологических установок будет производиться технологическим персоналом в автоматизированном режиме с помощью дистанционного управления под контролем АСУТП.

Система противоаварийной защиты должна строиться на автономно функционирующих средствах микропроцессорной техники, измерительных датчиках и исполнительных механизмах, и обеспечивать гарантированную реализацию алгоритмов защиты технологического процесса в предаварийных ситуациях.

Технические средства РСУ и ПАЗ должны быть резервированы. При выходе из строя какого-либо из модулей (блоков) должен происходить автоматический переход на резервный модуль (блок) с регистрацией и выдачей соответствующего сообщения. Должна быть предусмотрена возможность замены неисправных модулей в оперативном режиме работы РСУ и системы ПАЗ.

АСУТП должна иметь программные и аппаратные средства для подключения к локальной вычислительной сети производства (завода), а также к единой ("корпоративной") сети предприятия.

Гарантийный срок на оборудование систем РСУ и ПАЗ должен быть не менее 1 года с учётом срока хранения и при соблюдении Заказчиком условий хранения, монтажа и эксплуатации, оговоренных настоящим ТЗ, проектной и эксплуатационной документацией.

Требования к численности и квалификации персонала.

Персонал автоматизированной системы в соответствии с ролью, выполняемой им в процессе функционирования Системы, делится на 2 основные категории:

Оперативный (технологический) персонал;

Эксплуатационный (обслуживающий) персонал.

К оперативному персоналу относятся лица, непосредственно участвующие в принятии решений по управлению технологическим процессом и в выполнении функций защиты. В данном случае - это аппаратчики, начальники смен и технологических установок, технологи и начальники цехов.

Количество и квалификация технологического персонала определяется действующим штатным расписанием.

Внедрение Системы не повлияет на численность технологического персонала, однако потребует от него специальной подготовки.

К эксплуатационному (обслуживающему) персоналу относятся лица, обеспечивающие нормальные условия функционирования Системы в соответствии с Инструкциями по эксплуатации и обслуживанию, и выполняющие работы по техническому обслуживанию Системы.

Предполагается, что обслуживающий персонал подразделения АСУТП будет состоять как минимум из следующих категорий работников, прошедших соответствующее обучение:

Начальник сектора АСУТП

Ведущий инженер-электроник

Ведущий инженер-программист

Инженер-электроник

Инженер-программист

Сменный инженер.

Примечание

По согласованию с администрацией предприятия численность и состав персонала сектора АСУТП может быть оставлен в соответствии с существующим штатным расписанием.

Перед вводом Системы в эксплуатацию технологический и эксплуатационный персонал должен пройти соответствующее обучение.

Помимо персонала АСУТП, работу Системы обеспечивает также ремонтный персонал, непосредственно в функционировании Системы не участвующий, однако способный выполнить ремонт отказавших технических средств.

Требования к показателям назначения.

Оборудование РСУ и ПАЗ должно иметь модульную архитектуру, предусматривающую возможность расширения и развития функций АСУТП.

Программное обеспечение АСУТП должно иметь гибкую структуру, давать возможность легко адаптироваться к изменениям характеристик технологических процессов, обеспечивать модификацию алгоритмов решения задач и наборов участвующих в них переменных, переконфигурирование схем регулирования и управления.

Система ПАЗ должна обеспечивать функции противоаварийной защиты по заданным в технологическом регламенте алгоритмам, и иметь возможность переконфигурации при изменении алгоритмов защиты технологического процесса.

На стадии подготовки спецификаций проекта необходимо предусмотреть достаточные резервы по оперативной и дисковой памяти, а также по быстродействию микропроцессорных устройств и промышленных сетей, которые (резервы) потребуются для развития функций Системы.

Как РСУ, так и система ПАЗ, должны иметь 10% резерв по информационным и управляющим каналам.

Требования к надёжности.

Показатели надёжности Системы должны отвечать требованиям ГОСТ 24.701-86 ЕСС АСУ "Надёжность автоматизированных систем управления. Основные положения". Обеспечение необходимого уровня надёжности требует проведения специального комплекса работ, выполняемых на разных стадиях создания и эксплуатации АСУТП.

При решении вопросов обеспечения требуемого уровня надёжности АСУТП необходимо учитывать следующие особенности:

1) АСУТП является многофункциональной Системой, функции которой имеют различную значимость и, соответственно, характеризуются разным уровнем требований к надёжности их выполнения;

2) В работе АСУТП участвуют различные виды обеспечения, в том числе и так называемый "человеческий фактор", который может в существенной степени влиять на уровень надёжности АСУТП;

3) В состав АСУТП входит большое количество разнородных элементов (включая технологический и эксплуатационный персонал). При этом в выполнении одной функции АСУТП обычно участвуют несколько различных элементов, а один и тот же элемент может участвовать в выполнении нескольких функций Системы.

Поэтому при решении вопросов, связанных с надёжностью АСУТП, количественное описание, анализ, оценка и обеспечение надёжности необходимо проводить по каждой функции АСУТП в отдельности. В обоснованных случаях необходимо использовать анализ возможности возникновения в Системе аварийных ситуаций, ведущих к значительным техническим, экономическим или социальным потерям вследствие аварии объекта управления или автоматизированного комплекса в целом.

Уровень надёжности АСУТП в существенной степени зависит от следующих основных факторов:

Состав и уровень надёжности используемых технических средств, их взаимодействие и взаимосвязь в структуре комплекса технических средств АСУТП;

Состав и уровень надёжности используемых программных средств, их содержание, взаимосвязь и взаимодействие в структуре программного обеспечения АСУТП;

Уровень квалификации, организации работы, и уровень надежности технологического, эксплуатационного и обслуживающего персонала;

Рациональность распределения задач, решаемых Системой, между КТС, программным обеспечением, и персоналом;

Режимы и организационные формы эксплуатации КТС АСУТП;

Степень использования различных видов резервирования (структурного, информационного, алгоритмического, функционального, временного и др.);

Степень использования методов и средств технической диагностики;

Реальные условия функционирования АСУТП.

Пояснение

Свойства информационного, математического, лингвистического, правового обеспечения АСУТП влияют на надежность АСУТП косвенно - через функционирование технических и программных средств, действия технологического и эксплуатационного персонала, поэтому при решении вопросов, связанных с надежностью АСУТП, отдельно не учитываются.

При анализе надежности АСУТП необходимо учитывать, что элементы, входящие в состав какой-либо функциональной подсистемы, должны решать задачи взаимной компенсации нарушений нормальной работы, сводить к минимуму их неблагоприятные последствия, и предотвращать переход этих нарушений в отказы выполнения соответствующих функций:

Программное обеспечение функциональной подсистемы должно предотвращать возникновение отказов в выполнении функций АСУТП при отказах технических средств функциональной подсистемы и при ошибках персонала, участвующего в выполнении этой функции, либо должно обеспечить перевод отказов, ведущих к большим потерям, в отказы, сопряженные с малыми потерями;

Технические средства функциональной подсистемы должны не допускать перехода определенных нарушений в работе программного обеспечения и персонала в отказ выполнения функции АСУТП, либо минимизировать последствия отказа;

Технологический и эксплуатационный персонал должен принимать активные меры к недопущению отказов в работе функциональной подсистемы при отказах технических средств или при выявлении ошибок в программном обеспечении, либо к снижению потерь от таких отказов.

Выбор состава показателей надежности АСУТП необходимо производить на основе установленного данным Техническим заданием перечня функций Системы, видов их отказов, и перечня аварийных ситуаций, для которых регламентируют требования к надежности. Исходными данными для определения обоснованных требований к надежности АСУТП являются:

Виды и критерии отказов по всем рассматриваемым функциям АСУТП;

Уровень эффективности по всем функциям Системы и величины ущербов по всем видам отказов;

Состав персонала, технических и программных элементов, участвующих в выполнении каждой функции Системы;

Возможные пути повышения надежности для каждой функции АСУТП, и связанные с ним затраты;

Величины ущербов, связанные с возникновением в АСУТП аварийных ситуаций;

Возможные пути снижения опасности возникновения аварийных ситуаций, и связанные с ними затраты.

Требования по обеспечению надежности АСУТП должны определяться путем сопоставления потерь, связанных с отказами АСУТП в выполнении функций и с возникновением аварийных ситуаций, и затрат, связанных с обеспечением и повышением надежности АСУТП, включая удорожание оборудования.

Надежность технических средств и программного обеспечения, предназначенных для реализации каждой из функций Системы, должна обеспечивать в совокупности выполнение указанных требований по надежности функций Системы в целом.

## 2.2. Определение оптимального набора параметров объекта управления (лекция)

Идентификация динамических объектов в общем случае состоит в определении их структуры и параметров по наблюдаемым данным – входному воздействию и выходным величинам.

В этом случае объект (элемент системы, объект управления, элемент технологического процесса и т. п.) представляет собой "черный ящик". Исследователю необходимо, подвергая объект внешним воздействиям и анализируя его реакции, получить математическую модель (описание его структуры и параметров), то есть превратить "черный ящик" в "белый ящик", добиться его "информационной прозрачности". Графически процесс идентификации иллюстрирует рис. 2.1.

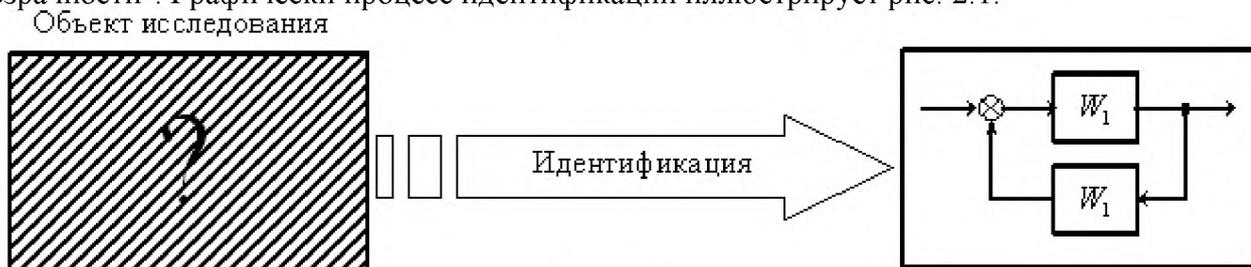


Рис. 2.1

Важным моментом этого процесса является выбор точек приложения внешних воздействий и сбор информации о реакциях объекта, то есть размещение управляющих устройств и датчиковых систем.

Решается при идентификации объектов и более простая (относительно простая) задача, это задача идентификации параметров, когда заранее известна структура математической модели объекта, но не известны ее параметры. В этом случае говорят о переходе от "серого ящика" к "белому ящику". Графически процесс идентификации параметров иллюстрирует рис. 2.2.



Рис. 2.2

Задача идентификации параметров может либо входить компонентом в общую задачу идентификации объекта, либо решаться самостоятельно.

Рассмотрим на обобщенной структуре и процедуре процесса идентификации основы подхода к решению задач идентификации. Обобщенная структура процесса идентификации показана на рис. 2.3.

Обобщенная процедура идентификации

1. Классификация объекта.
2. Выбор для определенного класса объекта настраиваемую модель, то есть модель, структуру и параметры которой можно менять в процессе идентификации.
3. Выбрать критерий (оценку) качества идентификации, характеризующий в виде функционала доступных для наблюдения переменных отличие модели и объекта.

4. Выбрать алгоритм идентификации (механизм настройки модели), обеспечивающий сходимость процесса идентификации, минимум критерия качества идентификации.

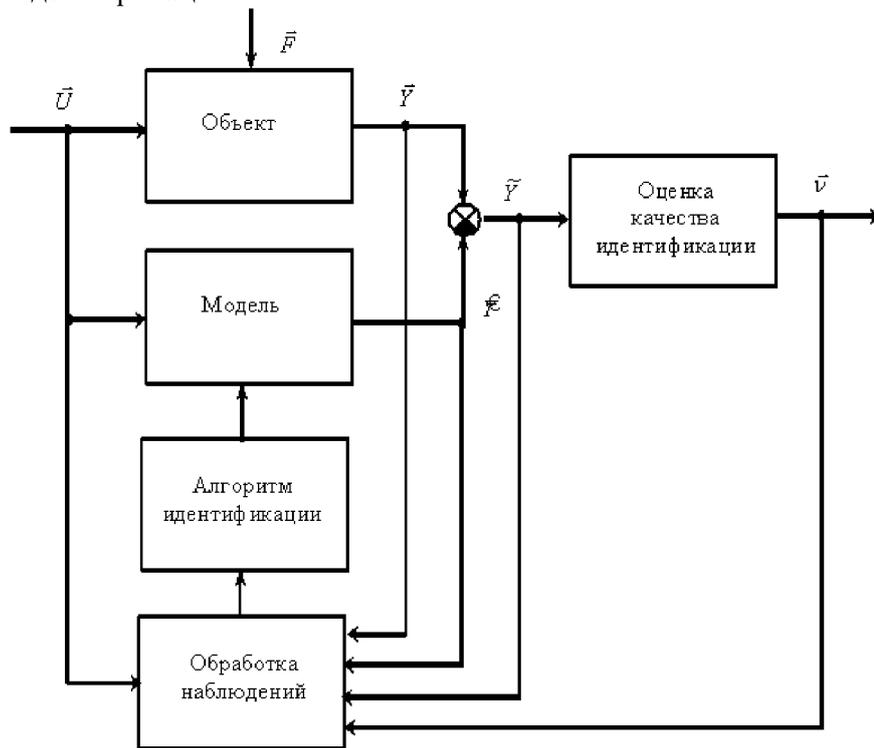


Рис. 2.3

Методы идентификации принято разделять на две группы:

- активная идентификация – идентификация вне контура управления,
- пассивная идентификация – идентификация в контуре управления.

**Активная идентификация**

В этом случае объект исследования выводится из условий нормальной окружающей среды (нормальный режим эксплуатации, номинальные параметры рабочего режима и т. п.). Исследования проводятся в специализированных лабораторных условиях, как это показано на рис. 2.4. На входы объекта (рабочие и дополнительные) подаются тестовые сигналы специального вида. Это могут быть:

- ступенчатые и импульсные временные сигналы,
- гармонические сигналы,
- случайные воздействия с заданными параметрами.

Активную идентификацию используют при разработке новых технологий применительно к действующим промышленным объектам, в изучении новых явлений, в первоначальной разработке математической модели.

**Пассивная идентификация**

При пассивной идентификации объект функционирует в контуре управления, находится в процессе нормальной эксплуатации. На его входы поступают только естественные сигналы управления.

Пассивную идентификацию используют для уточнения математической модели, для слежения за изменениями в объекте. Информация оперативно используется в системе управления объектом, процесс такой идентификации иллюстрируется рис. 2.5.

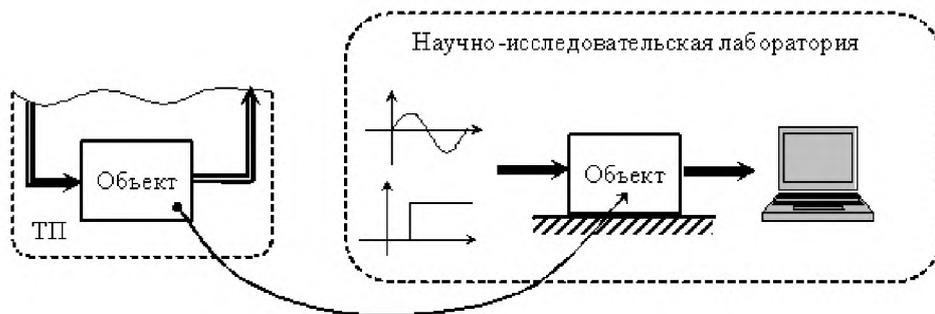


Рис. 4

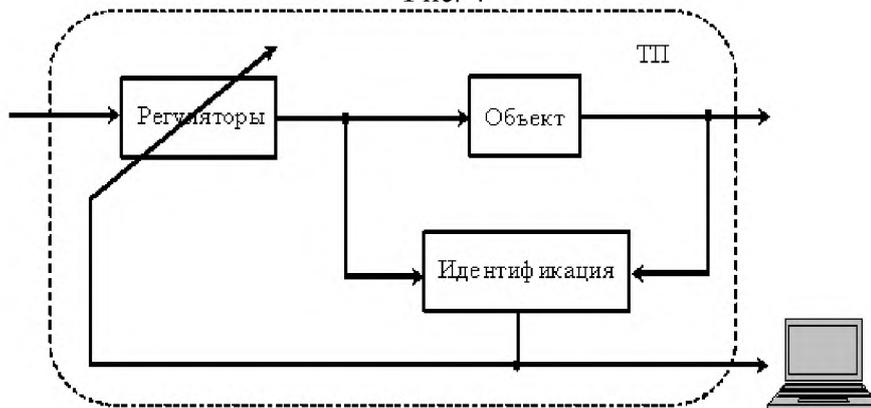


Рис. 2.

Кроме перечисленных групп методов реализуются и системы идентификации смешанного типа, когда объект не выводится из нормального режима эксплуатации, но к управляющим сигналам добавляются тестовые воздействия, позволяющие идентифицировать объект, не ухудшая качества основного процесса управления.

Более подробно рассмотрим активную идентификацию.

Активная идентификация объектов управления может производиться как во временной области, так и в частотной области. При этом в каждой области используют собственные алгоритмы и методы идентификации.

При активной идентификации в большинстве случаев используют полученные в результате экспериментов характеристики:

- частотные характеристики (АФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ и др.),
- временные характеристики (ступенчатое изменение задания, "узкий" импульс задания и др.).

Рассмотрим в качестве примера один из подходов решения задачи идентификации структуры и параметров объекта в частотной области. Ограничим рассмотрение объектом с одним входом и одним выходом.

Мы знаем, что если имеется математическая модель такого объекта в виде передаточной функции –

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1)$$

то это соответствует наличию полной информации о структуре и параметрах объекта, всех его характеристиках.

Преобразуем передаточную функцию (1) к полюсно-нулевому представлению, форме Боде –

$$H(s) = \frac{k(s+c_1)(s+c_2)\dots(s+c_m)}{(s+s_1)(s+s_2)\dots(s+s_n)} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент усиления ( $k = b_0/a_0$ ),  $c_i, s_i$  – соответственно полюсы и нули передаточной функции.

Если среди корней  $(c_i, s_i)$  встречаются комплексно сопряженные пары корней, то разложение (2) необходимо дополнить сомножителями следующего типа –

$$T^2 s^2 + 2T\xi s + 1.$$

Предполагая для простоты изложения отсутствие комплексно сопряженных корней, можно преобразовать (2) к следующему виду –

$$H(s) = \frac{k'(Q_1 s + 1)(Q_2 s + 1) \dots (Q_m s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} \quad (3)$$

где

$$k' = k \frac{s_1 s_2 \dots s_n}{c_1 c_2 \dots c_m}, \quad T_i = \frac{1}{s_i}, \quad Q_i = \frac{1}{c_i}.$$

По выражению для передаточной функции в виде (3) получим частотную характеристику объекта –

$$H(j\omega) = \frac{k'(jQ_1\omega + 1)(jQ_2\omega + 1) \dots (jQ_m\omega + 1)}{(jT_1\omega + 1)(jT_2\omega + 1) \dots (jT_n\omega + 1)},$$

ЛАЧХ –

$$L(\omega) = 20 \lg k' + 20 \sum_{i=1}^m \lg \sqrt{Q_i^2 \omega^2 + 1} - 20 \sum_{i=1}^n \lg \sqrt{T_i^2 \omega^2 + 1} \quad (4)$$

ЛФЧХ –

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^m \arg \operatorname{tg}(Q_i \omega) - \sum_{i=1}^n \arg \operatorname{tg}(T_i \omega) \quad (5)$$

С другой стороны, нам известно, что ЛАЧХ и ЛФЧХ динамических звеньев с передаточными функциями –

$$H_1(s) = Ts + 1, \quad H_2(s) = \frac{1}{Ts + 1},$$

имеет вид, показанный на рис. 6, так как звенья являются соответственно форсирующим и аperiodическим динамическими звеньями первого порядка.

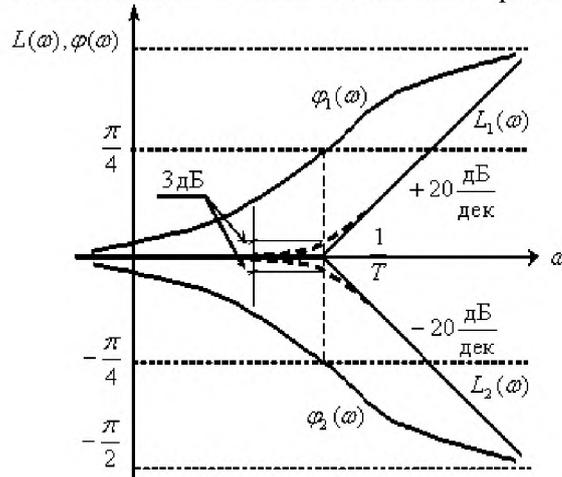


Рис. 2.6

Исходя из изложенного материала, можно предложить следующую процедуру активной идентификации структуры и параметров линейной системы с одним входом и одним выходом:

1. В процессе эксперимента с объекта снимается частотная характеристика в виде ЛАЧХ и ЛФЧХ.

2. Полученная экспериментально ЛАЧХ аппроксимируется кусочно-линейной кривой – набором отрезков (асимптот) с целочисленным наклоном кратным 20 дБ/дек.

3. По наклону асимптот и частотам сопряжения асимптот определяется передаточная функция объекта в виде произведения передаточных функций соответствующих асимптотам элементарных динамических звеньев (апериодических и форсирующих).

При наличии в полученной ЛАЧХ и ЛФЧХ признаков звеньев второго порядка, то есть асимптот с наклоном кратным 40 дБ/дек, необходимо ввести такие звенья в модель.

Колебательное звено с передаточной функцией –

$$H(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1},$$

имеет ЛАЧХ и ЛФЧХ, показанные на рис. 2.7.

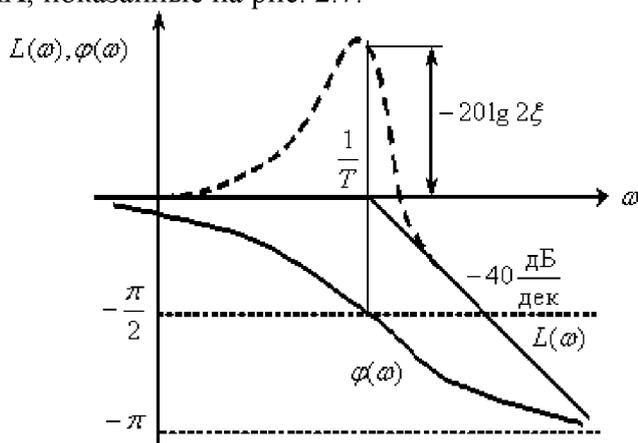


Рис. 2.7

Форсирующее звено второго порядка с передаточной функцией

$$H(s) = T^2 s^2 + 2T\xi s + 1,$$

имеет ЛАЧХ (ЛФЧХ) симметричные показанным на рис. 2.7 характеристикам колебательного звена относительно оси частот.

Рассмотрим пример идентификации по рассмотренной процедуре.

Пример

По экспериментально полученной ЛАЧХ объекта определить передаточную функцию.

Решение

Аппроксимируем экспериментальную ЛАЧХ набором асимптот, как это показано на рис. 2.8.

Рассмотрим теперь участки аппроксимированной ЛАЧХ, на которых наклон не изменяется:

$$1. \quad 0 < \omega < \omega_1.$$

На этом интервале виду асимптоты соответствует ЛАЧХ интегрирующего звена, его передаточная функция –

$$H_1(s) = \frac{k}{s}.$$

Этому звену соответствует следующее выражение ЛАЧХ –

$$L_1(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega.$$

Используем последнее выражение для определения  $k$ , подставив значение характеристики при частоте  $\omega = 0,1$

$$L_1(0,1) = 30 = 20 \lg k - 20 \lg 0,1 \rightarrow k = \sqrt{10}.$$

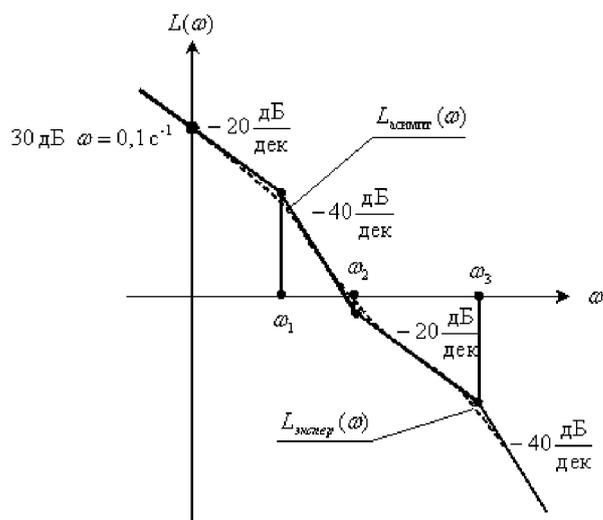


Рис. 2.8

$$\omega_1 \leq \omega < \omega_2.$$

На этом интервале наклон асимптоты возрос на 20 дБ/дек, что соответствует добавлению аperiodического звена первого порядка с передаточной функцией –

$$H_2(s) = \frac{1}{T_1 s + 1},$$

где постоянная времени определяется по точке сопряжения асимптот –

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1}.$$

$$2. \omega_2 \leq \omega < \omega_3.$$

На этом интервале наклон асимптоты уменьшился на 20 дБ/дек, что соответствует добавлению форсирующего звена первого порядка с передаточной функцией –

$$H_3(s) = Q_1 s + 1,$$

где постоянная времени определяется по точке сопряжения асимптот –

$$Q_1 = \frac{1}{\omega_2}.$$

$$3. \omega_3 \leq \omega < \infty.$$

На этом интервале наклон асимптоты возрос на 20 дБ/дек, что соответствует добавлению аperiodического звена первого порядка с передаточной функцией –

$$H_4(s) = \frac{1}{T_2 s + 1},$$

где постоянная времени определяется по точке сопряжения асимптот –

$$T_2 = \frac{1}{\omega_3}.$$

Перемножая полученные передаточные функции, получим передаточную функцию объекта –

$$H(s) = H_1(s)H_2(s)H_3(s)H_4(s) = \frac{k(Q_1 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

### 2.3. Экспериментальное определение параметров объекта

(лекция)

При изучении объекта исследования, прежде всего, выбирают входную и выходную переменную. Если определяют динамические характеристики объекта

управления, то в качестве входной величины принимают положение регулирующего органа, а в качестве выходной – сигнал измерительного преобразователя, поступающий на вход регулятора. При исследовании замкнутой системы регулирования входное воздействие наносят перемещением датчика, фиксируя при этом изменение выходной величины – сигнал измерительного преобразователя [8].

Обработка результатов эксперимента включает в себя целый ряд операций, которые завершаются аппроксимацией переходной характеристики с помощью типовых элементарных звеньев.

Предварительный выбор передаточной функции можно сделать по начальному участку переходной функции (рисунок 2.1).

Передаточной функцией 1 (табл. 2.1) аппроксимируют переходные функции, наклон графиков которых в начальный момент времени максимален, то есть переходные функции объектов без запаздывания (кривая 1 на рисунок 2.1). Применение такой передаточной функции требует определения наименьшего числа параметров – двух для объектов с самовыравниванием.

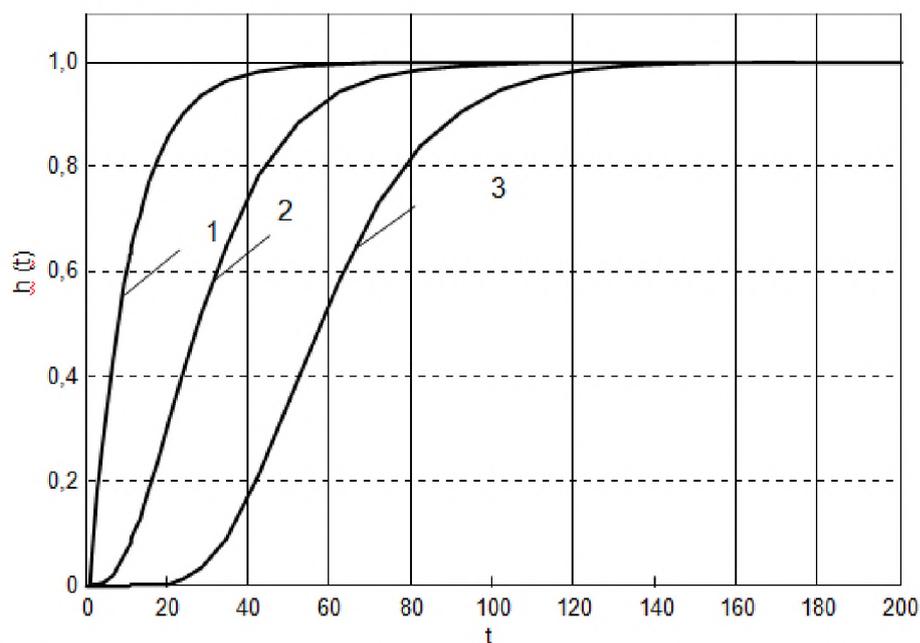


Рисунок 2.1. Переходные функции объектов регулирования с самовыравниванием: 1 – без запаздывания; 2 – с емкостным запаздыванием; 3 – с емкостным и чистым запаздыванием

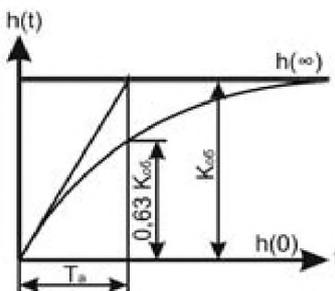
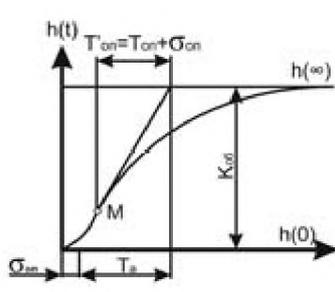
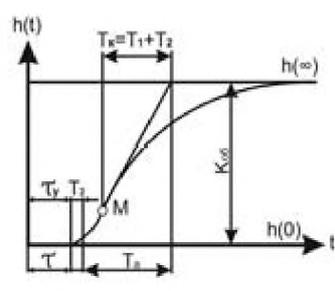
Передаточной функцией 1 (таблица 2.1) аппроксимируют переходные функции, наклон графиков которых в начальный момент времени максимален, то есть переходные функции объектов без запаздывания (кривая 1 на рисунок 2.1). Применение такой передаточной функции требует определения наименьшего числа параметров – двух для объектов с самовыравниванием.

Однако переходные функции большинства промышленных объектов имеют, как правило, вид кривых 2 и 3 (рисунок 2.1). Для аппроксимации таких переходных функций используют передаточные функции 2 и 3 (таблица 2.1).

Для объектов с малым емкостным запаздыванием наиболее распространена передаточная функция 2, которой аппроксимируют переходные функции объектов, для которых свойственно только емкостное запаздывание (кривая 2 на рисунок 2.1).

Таблица 2.1

Определение динамических параметров объектов с самовыравниванием по экспериментальной переходной функции

№ п/п	Тип звена	Аппроксимирующая передаточная функция и решение дифференциального уравнения	Динамические параметры	Определение динамических параметров
1	2	3	4	5
1	Инерционное звено первого порядка	$W(p) = \frac{k_{об}}{T_a p + 1};$ $h(t) = k_{об} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right)$	$k_{об}, T_a$	
2	Инерционное звено второго порядка $T_{оп}, \sigma_{оп}$	$W(p) = \frac{k_{об}}{(T_{оп} p + 1)(\sigma_{оп} + 1)};$ $h(t) = k_{об} \left( 1 - \frac{T_{оп}}{T_{оп} - \sigma_{оп}} e^{-\frac{t}{T_{оп}}} + \frac{\sigma_{оп}}{T_{оп} - \sigma_{оп}} e^{-\frac{t}{\sigma_{оп}}} \right)$	$k_{об}, T_{оп}, \sigma_{оп}$	
3	Инерционное звено второго порядка с условным запаздыванием	$W(p) = \frac{k_{об} e^{-\tau_y p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$ <p>где <math>T_1 \gg T_2</math>;</p> $h(t) = k_{об} \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t - \tau_y}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t - \tau_y}{T_2}} \right)$	$k_{об}, T_1, T_2, \tau_y$	

Передаточную функцию 3 (таблица 2.1) обычно используют для аппроксимации переходных функций объектов с большим запаздыванием, для которых свойственно только емкостное и чистое запаздывание (кривая 3 на рисунок 2.1).

В таблице 2.2 приведены наиболее распространенные методы определения динамических параметров объекта без самовыравнивания и показаны графические построения, выполняемые при их использовании.

Таблица 2.2

Определение динамических параметров объекта без самовыравнивания по экспериментальной переходной функции

№ п/п	Тип звена	Аппроксимирующая передаточная функция и решение дифференциального уравнения	Динамические параметры	Определение динамических параметров
1	Идеальное интегрирующее звено	$W(p) = \frac{\varepsilon}{p} = \frac{1}{T_{\text{и}} p};$ $h(t) = \varepsilon t;$ $\varepsilon = \frac{1}{T_{\text{и}}}$	$T_{\text{и}} = \frac{1}{\varepsilon}$	
2.1	Реальное интегрирующее звено	$W(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p (Tp + 1)};$ $h(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \times$ $\times \left( t - T \left( 1 - e^{-\frac{1}{T} t} \right) \right)$	$T_{\text{и}} = \frac{1}{\varepsilon}$ $T$	
2.2	Идеальное интегрирующее звено с запаздыванием	$W(p) = \frac{e^{-\tau p}}{T_{\text{и}} p};$ $h(t) = \frac{t - \tau}{T_{\text{и}}}$	$T_{\text{и}} = \frac{1}{\varepsilon}$ $T$	
3	Реальное интегрирующее звено с запаздыванием	$W(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p (Tp + 1)} \times$ $\times e^{-\tau p};$ $h(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \times$ $\times \left( t - T \left( 1 - \frac{t - \tau}{T} \right) \right)$	$T_{\text{и}} = \frac{1}{\varepsilon}$ $T$ $\tau$	

Динамические параметры объекта по его экспериментально снятой переходной характеристике определяют графическими или графо-аналитическими методами. При определении динамических параметров объекта вначале проводят касательную к переходной характеристике объекта таким образом, чтобы как можно больше точек прямой и переходной характеристики объекта совпали, затем определяют динамические параметры передаточной функции [5].

Предварительный выбор передаточной функции можно сделать по начальному участку переходной функции (рисунок 2.2).

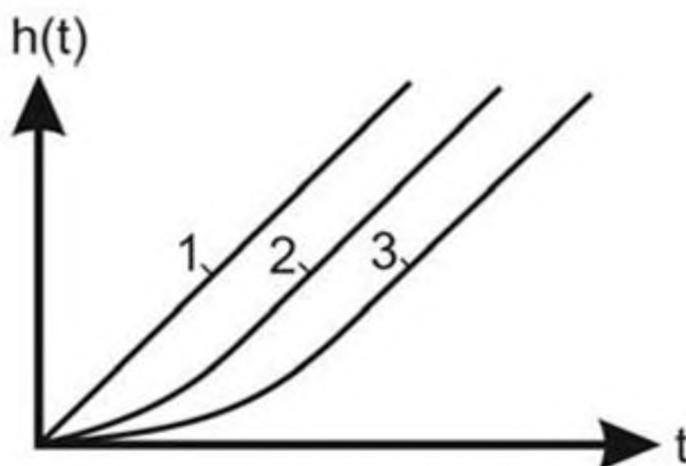


Рисунок 2.2. Переходные функции объектов регулирования без самовыравнивания: 1 – без запаздывания; 2 – с емкостным запаздыванием; 3 – с емкостным и чистым запаздыванием.

Передаточной функцией 1 (таблица 2.2) аппроксимируют переходные функции, наклон графиков которых в начальный момент времени максимален, то есть переходные функции объектов без запаздывания (кривая 1 на рисунке 2.2). Применение такой передаточной функции требует определения наименьшего числа параметров – одного для объектов без самовыравнивания.

Однако переходные функции большинства промышленных объектов без самовыравнивания имеют, как правило, вид кривых 2 и 3 (рисунок 3.2). Для аппроксимации таких переходных функций используют передаточные функции 2 и 3 (таблица 2.2).

Наиболее распространена передаточная функция 2, которой аппроксимируют как переходные функции объектов, для которых свойственно только емкостное запаздывание (кривая 2 на рисунке 2.2), так и переходные функции объектов, обладающих емкостным и чистым запаздыванием (кривая 3 на рисунке 2.2).

Передаточную функцию 3 (таблица 2.2) обычно используют для аппроксимации переходных функций объектов, для которых свойственно только емкостное запаздывание (кривая 2 на рисунке 2.2).

Динамические параметры объекта по его экспериментально снятой переходной характеристике определяют графическими или графоаналитическими методами. При определении динамических параметров объекта вначале проводят касательную к переходной характеристике объекта таким образом, чтобы как можно больше то чек прямой и переходной характеристики объекта совпали, затем определяют динамические параметры передаточной функции [5].

При снятии импульсных характеристик для успешного проведения исследований существенное значение имеет правильный выбор длительности импульса. Чем меньше время импульса, тем ближе экспериментальная временная характеристика к истинной импульсной. Однако при малых значениях длительности импульса обработка результатов становится затруднительной из-за малых отклонений выходной переменной от своих первоначальных значений. Поэтому на практике идут на определенное искажение импульсной характеристики, увеличивая длительность импульса. При снятии импульсных характеристик длительность импульса чаще всего определяют опытным путем в процессе проведения эксперимента.

В основе этого метода лежит определение площадей, ограниченных кривыми изменения входной и выходной величины. Вначале определяют время запаздывания  $\tau$ . Для этого проводят среднюю линию возмущения, которая при симметричном импульсном воз действии совпадает с его геометрической осью (рисунок 2.3), затем – еще одну

вертикаль, отсекающую на импульсной характеристике равные площади  $S_1$  и  $S_2$  (с горизонтальной штриховкой).

Время запаздывания определяют по формуле:

$$\tau = \tau' - t_{cp} \quad (3.1)$$

Остальные параметры для объекта с самовыравниванием находят по формулам:

$$K_{об} = \frac{S_{ВЫХ}}{S_{ВХ}};$$

$$T = \frac{S_{ВЫХ}}{\Delta x_{ВЫХ. \text{ макс}}},$$

где  $S_{ВХ}$  – площадь, ограниченная кривой входного воздействия;

$S_{ВЫХ}$  – площадь, ограниченная кривой изменения регулируемой величины (на рисунок 3.3 заштрихованы наклонно).

Для объекта без самовыравнивания – по формуле:

$$\varepsilon_{об} = \frac{\Delta x_{ВЫХ. \text{ макс}}}{S_{ВХ}}.$$

Импульсные функции для разных типов объектов представлены на рисунке 3.3.

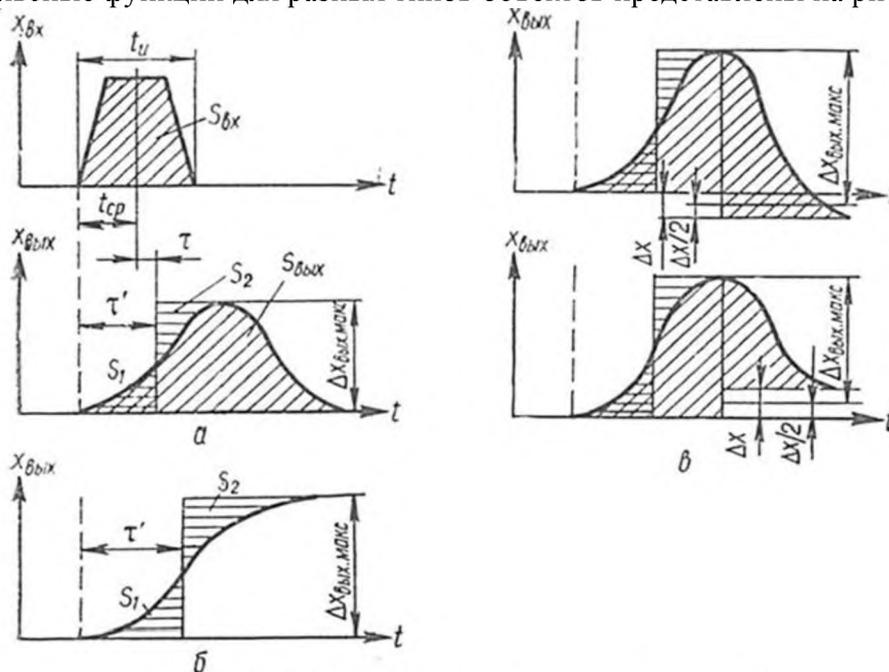


Рисунок 2.3. Обработка импульсных функций:

а – объекта с самовыравниванием; б – объекта без самовыравнивания; в – объекта с самовыравниванием при расхождении между начальным и конечным значением регулируемой величины

На рисунок 3.3, в показана особенность определения  $\Delta x_{ВЫХ. \text{ макс}}$  и  $S_{ВЫХ}$  для случая, когда на объекте с самовыравниванием получена импульсная функция с расхождением (не более 20 % значения  $\Delta x_{ВЫХ. \text{ макс}}$ ) между начальным и конечным значением регулируемой

величины. Увеличение значения  $t_n$  при прочих равных условиях приводит к увеличению погрешности определения динамических параметров объекта. Однако при условии  $t_n < \tau$  погрешность не превышает 10 %.

Рассмотрим контур управления, приведенный на рисунке 2.4. Каждый из элементов данного контура имеет четкое назначение. Так при создании системы управления объект считается заданной неизменной частью системы. Конечно, в практике проектирования имеется множество случаев, когда свойства объекта также можно корректировать в соответствии с требованиями других элементов контура. В дальнейшем будем считать, что свойства объекта заданы и неизменны.

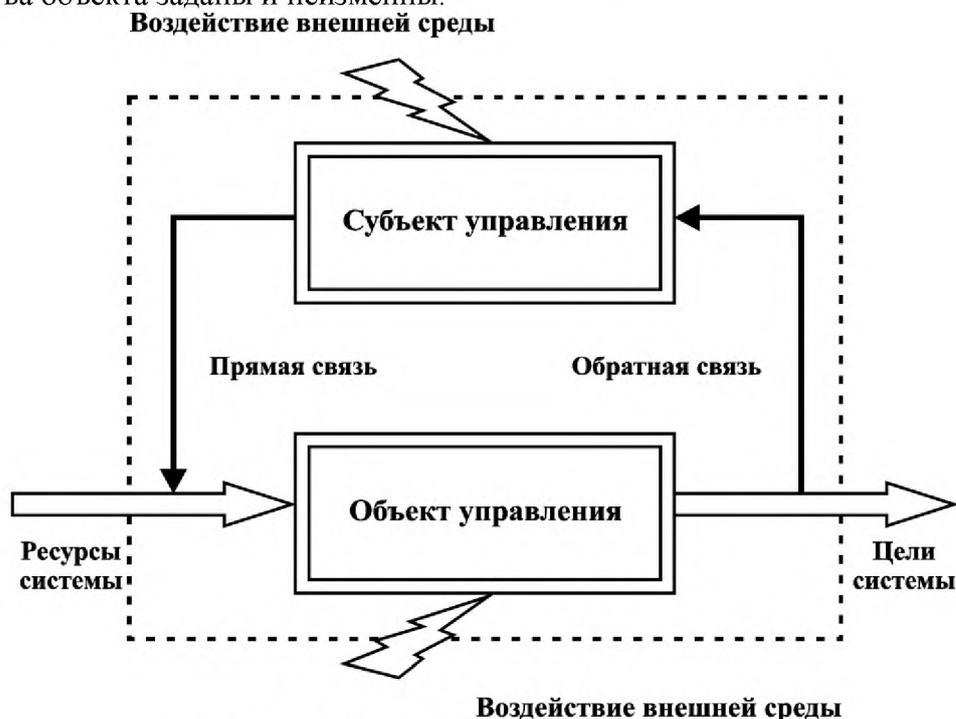


Рисунок 2.4 Модельный контур управления

Каждый из элементов данного контура имеет четкое назначение. Так при создании системы управления объект считается заданной неизменной частью системы. Конечно, в практике проектирования имеется множество случаев, когда свойства объекта также можно корректировать в соответствии с требованиями других элементов контура. В дальнейшем будем считать, что свойства объекта заданы и неизменны. Функции обратной связи и элемента сравнения в контуре управления также определены. Таким образом, оставшийся элемент данного контура, устройство управления, является тем блоком, который на основе текущей ошибки  $\Delta$  вырабатывает требуемое текущее управление  $u$ . В теории управления принято данный блок характеризовать законом управления.

Различают линейные и нелинейные законы управления. Как и системы управления в целом, так и законы управления бывают непрерывные и дискретные.

Рассмотрим линейные непрерывные законы управления. Отметим, что выбор того или другого закона управления для данного объекта и является одной из основных задач, решаемых при разработке системы управления объектом, поэтому здесь приводятся только их основные свойства, а не их подбор.

## 2.4. Разработка структурных схем технологических процессов

(лекция)

В САУ рассматриваются три типа схем

- электрическая принципиальная;
- функциональная;
- структурная.

Под функциональной схемой САУ понимают ее символическое изображение как совокупности приборов и устройств, работающих по определенной логической схеме. При этом приборы и устройства изображаются на функциональной схеме прямоугольниками или иными символами, соответствующими ГОСТ. Связи между ними изображаются стрелками. Внутри же прямоугольников записываются буквами или любыми иными символами (кроме операторов) функциональные назначения приборов и устройств. Пример функциональной схемы системы угловой стабилизации ракеты по одному из каналов изображен на Рисунок 1.

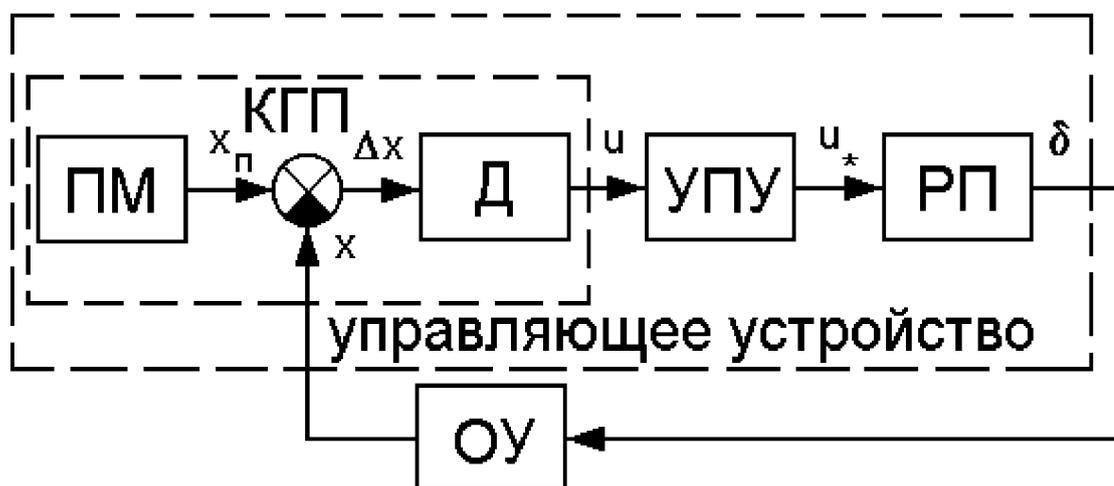


Рисунок 1.14. Функциональная схема системы угловой стабилизации ракеты по одному из каналов

Согласно схеме Рисунок 1 при отклонении объекта управления (ОУ) - ракеты под действием каких-либо факторов от требуемой траектории с помощью программного механизма (ПМ) и датчика (Д) командного гироскопического прибора (КГП) формируется ошибка управления в виде электрического сигнала  $u$ , пропорционального разности программного и текущего значений угловой координаты ракеты  $\Delta x = x_{\text{п}} - x$ . С помощью усилительно-преобразовательного устройства (УПУ) этот сигнал преобразуется согласно выбранному закону управления, усиливается по мощности и подается в виде электрического сигнала  $u_*$  на рулевой привод (РП). Рулевой привод отклоняет рули ракеты на угол  $\delta$ , что приводит к развороту ракеты таким образом, чтобы ошибка  $\Delta x = x_{\text{п}} - x$  стремилась к нулю.

Под структурной схемой будем понимать совокупность приборов и устройств, образующих САУ, работающих по определенной логической схеме и отображенных в виде звеньев с их передаточными функциями. Так как передаточные функции являются полными аналогами звеньев и «говорят» все об их свойствах, то структурная схема САУ также дает исчерпывающее представление о всех ее свойствах, в том числе:

- в установившемся состоянии при  $t \rightarrow \infty$ ;
- в переходном процессе (или процессах);
- при случайных воздействиях.

Она также несет полную информацию об устойчивости или неустойчивости как САУ в целом, так и отдельных ее частей и звеньев. Анализ всех этих качеств САУ по ее структурной схеме называют структурным анализом.

Существует несколько методов построения структурных схем. Наиболее распространены следующие из них:

- построение структурной схемы САУ по ее исходным дифференциальным и алгебраическим уравнениям;

построение структурной схемы САУ по ее функциональной схеме при известных передаточных функциях звеньев.

Рассмотрим методологию построения структурной схемы САУ на основе первого метода.

Пусть даны уравнения САУ в общем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_{\text{п}} - x, A_1(p)u = B_1(p)\Delta x, \\ \Delta u &= u + f, A_2(p)x = B_2(p)\Delta u. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В этих уравнениях  $p = d/dt$  - оператор дифференцирования,  $x_{\text{п}}$  - программное значение регулируемой величины,  $x$  - действительное (текущее) значение регулируемой величины,  $\Delta x$  - ошибка регулирования,  $u$  - сигнал управления,  $f$  - возмущающее воздействие,  $\Delta u$  - результирующий сигнал управления,  $A_1(p), A_2(p), B_1(p), B_2(p)$  - некоторые операторы.

Для построения структурной схемы САУ из системы уравнений (1) найдем соответственно передаточные функции - дифференциальные операторы ее составных частей: регулятора и объекта регулирования. При этом можно получить, что

$$\frac{u(t)}{\Delta x(t)} = W_1(p) = \frac{B_1(p)}{A_1(p)}, \quad (2)$$

$$\frac{x(t)}{\Delta u(t)} = W_2(p) = \frac{B_2(p)}{A_2(p)}. \quad (3)$$

С помощью полученных передаточных функций и алгебраических уравнений сумматоров для сигналов  $\Delta x$  и  $\Delta u$  можно легко построить структурную схему САУ в дифференциальных операторах, имеющую вид Рисунок 1.15..

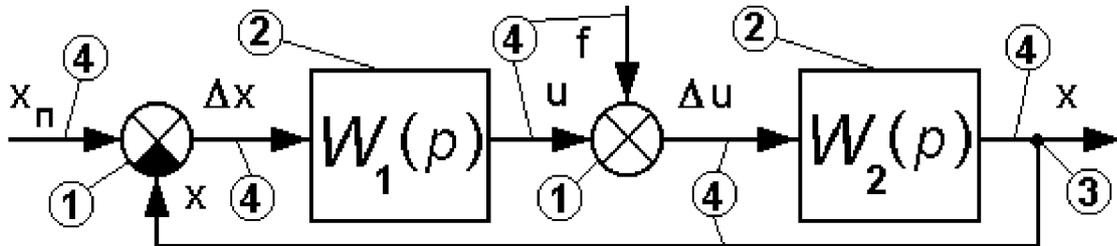


Рисунок 1.15. Структурная схема САУ в дифференциальных операторах

На структурных схемах в дифференциальных операторах все сигналы являются функциями времени. При этом вместо записей  $x(t), u(t)$  и т.д. используются соответственно записи  $x, u$  и т.д.

Схема Рисунок 1.15. является типовой практически для всех одномерных, одноконтурных САУ. Она содержит следующие универсальные элементы:

- сумматоры (их два, обозначены цифрой 1);
- динамические звенья (их тоже два, обозначены цифрой 2);
- узел (он один, обозначен цифрой 3);
- линии (их семь, обозначены цифрой 4).

Сумматорами обозначаются места суммирования или вычитания одинаковых физических величин (при вычитании соответствующий сектор сумматора зачерняется). Динамическими называют звенья, свойства которых описываются не алгебраическими, а дифференциальными уравнениями. Узлами называют места расщепления одних и тех же

величин, как входных, так и выходных. Линия - это условная связь между какими-либо элементами структурной схемы. При этом стрелка на линии означает, что обратное влияние звеньев САУ друг на друга практически отсутствует (т.е. действие против стрелки пренебрежимо мало).

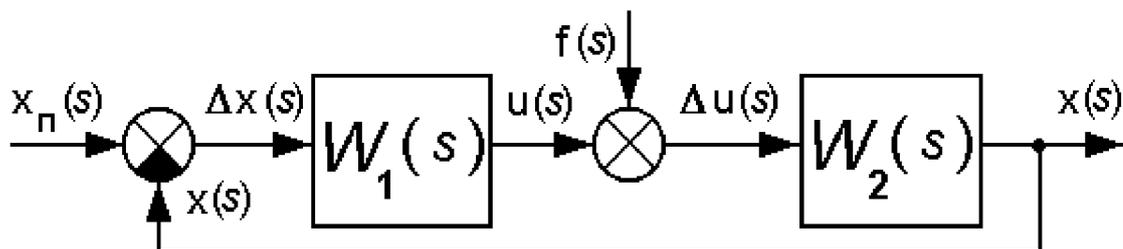


Рисунок 1.16. Структурная схема САУ в операторах Лапласа

Кроме схемы Рисунок 2 часто используется абстрактная структурная схема САУ в операторах Лапласа, изображенная на Рисунок 3. На ней в качестве сигналов выступают соответствующие изображения по Лапласу, а в качестве операторов звеньев - передаточные функции по Лапласу.

#### Тождественные преобразования структурных схем

Приведение структурной схемы или ее части к более простому виду без потери каких-либо свойств САУ называется тождественным преобразованием структурной схемы.

В структурных схемах звенья могут быть включены :

последовательно;

параллельно;

встречно-параллельно (по принципу обратной связи).

Рассмотрим, как преобразовать эти цепи тождественным образом к более простому виду. Смысл преобразования заключается в том, чтобы найти передаточную функцию одного эквивалентного звена, свойства которого полностью совпадали бы со свойствами группы звеньев, образующих исходную цепочку. Для уяснения правила тождественного преобразования последовательного соединения звеньев обратимся к Рисунок 4.

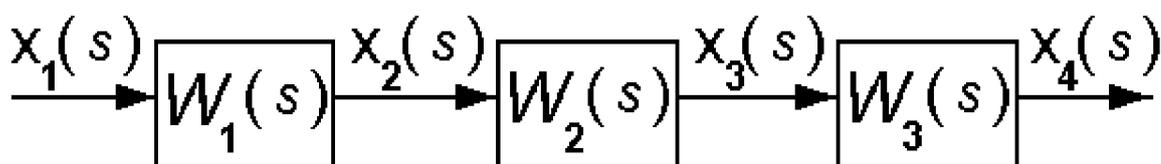


Рисунок 1.17. Последовательное соединение трех динамических звеньев

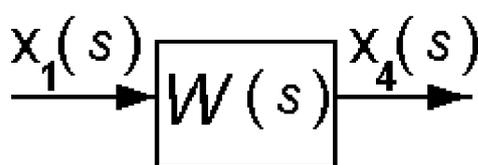


Рисунок 1.18 Эквивалентная структурная схема

Эту структурную схему требуется заменить равносильной в виде Рисунок 5. Для поиска передаточной функции  $W(s)$  выполним следующие операции:

$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{x_4(s)}{x_1(s)} = \frac{x_4(s)}{x_1(s)} \cdot \frac{x_2(s)}{x_2(s)} \cdot \frac{x_3(s)}{x_3(s)} = \\
 &= \frac{x_2(s)}{x_1(s)} \cdot \frac{x_3(s)}{x_2(s)} \cdot \frac{x_4(s)}{x_3(s)} = W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Таким образом, передаточная функция трех последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций.

Используя метод математической индукции и обобщая полученный результат на произвольное число звеньев в схеме Рисунок 1.16, можно вывести следующее правило: если звенья включены последовательно, то эквивалентная передаточная функция цепи численно равна произведению передаточных функций звеньев, составляющих данную цепь.

Полагаем теперь, что звенья включены в цепи параллельно, например, в схеме Рисунок 1.17.

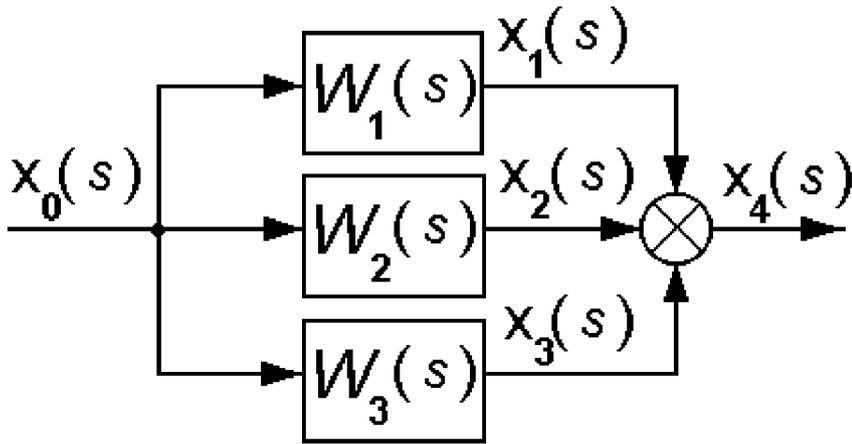
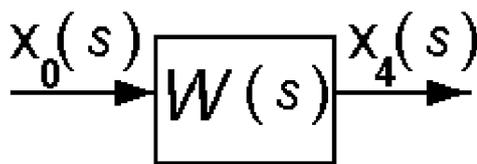


Рисунок 1.19 Параллельное соединение трех динамических звеньев

Для цепи Рисунок 6 требуется найти эквивалентную схему в виде Рисунок 7.



Найдем теперь эквивалентный оператор  $W(s) = x_4(s) / x_0(s)$ . С этой целью сначала запишем уравнение сумматора

$$x_4(s) = x_1(s) + x_2(s) + x_3(s). \quad (5)$$

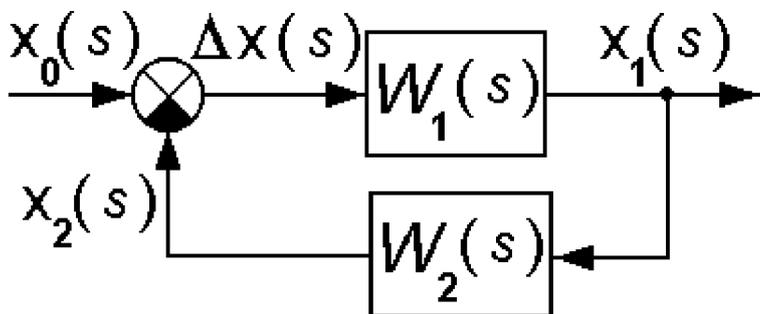
Рисунок 1.20 Эквивалентная структурная схема

Разделим обе части выражения (5) на сигнал  $x_0(s)$ .

При этом

$$W(s) = \frac{x_4(s)}{x_0(s)} = \frac{x_1(s)}{x_0(s)} + \frac{x_2(s)}{x_0(s)} + \frac{x_3(s)}{x_0(s)} = W_1(s) + W_2(s) + W_3(s). \quad (6)$$

Обобщая полученный результат на произвольное количество звеньев, приходим к правилу: если звенья включены параллельно, то эквивалентная передаточная функция цепи численно равна сумме передаточных функций звеньев, составляющих данную цепь.



Рассмотрим теперь тождественное преобразование структурной схемы системы, построенной по принципу обратной связи или встречно-параллельного соединения. Для этого воспользуемся Рисунок 1.21. В этой схеме  $W_1(s)$  - передаточная функция прямой цепи,  $W_2(s)$  - передаточная

Рисунок 1.21. Структурная схема САУ с соединением по принципу обратной связи

функция обратной связи. Здесь же  $x_0(s)$  - любое входное воздействие,  $x_1(s)$  - выходной сигнал системы,  $x_2(s)$  - сигнал обратной связи,  $\Delta x(s)$  - ошибка управления.

Для схемы Рисунок 8 справедливы уравнения

$$\Delta x(s) = x_0(s) - x_2(s), \Rightarrow x_0(s) = \Delta x(s) + x_2(s) \quad (7)$$

$$x_1(s) = W_1(s)\Delta x(s), \quad (8)$$

$$x_2(s) = W_2(s)x_1(s) = W_2(s)W_1(s)\Delta x(s). \quad (9)$$

В данном случае эквивалентная структурная схема имеет вид Рисунок 9.

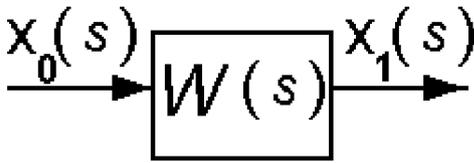


Рисунок 1.22. Эквивалентная структурная схема

С учетом соотношений (7)-(9) найдем эквивалентную передаточную функцию. При этом следует помнить, что для обозначения передаточных функций замкнутых систем наряду с символом  $W$  весьма часто используют символ  $\Phi$  с соответствующими индексами или без них. Для схемы Рисунок 8 имеем

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{x_1(s)}{x_0(s)} = \frac{x_1(s)}{\Delta x(s) + x_2(s)} = \frac{W_1(s)\Delta x(s)}{\Delta x(s) + W_2(s)W_1(s)\Delta x(s)} = \\ &= \frac{W_1(s)}{1 + W_2(s)W_1(s)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражения (10) следует правило: передаточная функция системы с обратной связью представляет собой дробь, числитель которой равен передаточной функции прямой цепи, а знаменатель равен единице плюс передаточная функция «кольца». При этом под передаточной функцией «кольца» понимают произведение передаточной функции прямой цепи и передаточной функции обратной связи.

На практике в основном встречаются системы с отрицательной обратной связью. Однако бывают случаи, когда обратная связь в схеме Рисунок 8 - положительная. При этом правило поиска передаточной функции остается практически прежним, но в знаменателе эквивалентной передаточной функции знак «плюс» меняется на знак «минус».

## 2.5. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимального распределения ресурсов (лекция)

Методы нелинейного программирования применяются для решения задач с нелинейными функциями переменных.

В общем случае задача математического программирования записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{x}) &\rightarrow \max(\min); \\ \varphi_i(\mathbf{x}) &\leq (\geq) 0, & i = \overline{1, m_1}; \\ \psi_k(\mathbf{x}) &= 0, & k = \overline{1, m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Если хотя бы одна функция в модели (2.1) нелинейна, имеем задачу нелинейного программирования (НП). Размерность задачи характеризуется размерностью вектора переменных  $n$  и числом условий  $m_1+m_2$ . Однако сложность задачи определяется не столько размерностью, сколько свойствами функций цели и ограничений.

Разнообразие задач НП очень велико. Универсальных методов решения таких задач не существует. Имеется весьма ограниченное число точных методов и намного больше приближенных.

Наиболее развиты методы решения задач выпуклого программирования. К этому классу относятся задачи НП с выпуклым допустимым множеством и выпуклой целевой функцией при минимизации или вогнутой при максимизации. Допустимое множество выпуклое, если все функции  $\psi_k$  линейные и  $\varphi_i$  выпуклы при неравенстве  $\leq$  или вогнуты при  $\geq$ . Например, условие  $x_1^2 + x_2^2 \leq r^2$  порождает выпуклое множество, пересечение которого с прямой  $x_1 + x_2 = 0$  дает тоже выпуклое множество. Очевидно, что задачи ЛП относятся к этому классу. Главная особенность задач выпуклого программирования в том, что они унимодальны, то есть любой их локальный оптимум является глобальным. Для ряда задач выпуклого программирования с дифференцируемыми функциями разработаны точные методы. Наибольшие сложности возникают при решении многоэкстремальных задач, которые по определению не относятся к классу выпуклых.

Важным классом НП являются задачи квадратичного программирования. В них целевая функция представляет собой сумму линейной и квадратичной форм, а все условия линейные. При выпуклости (вогнутости) квадратичной формы они являются частным случаем задач выпуклого программирования.

В нелинейном программировании выделяют также задачи сепарабельного программирования. Это задачи, в которых все функции сепарабельны. Функция сепарабельна, если она представляется в виде суммы функций отдельных переменных. Линейная функция – частный случай сепарабельной. Сепарабельная задача может быть одновременно и задачей выпуклого программирования.

Задачи геометрического программирования составляют отдельный класс НП. Все функции в таких задачах являются позиномами. В общем виде позиномом называется функция

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^l C_k \cdot x_1^{\alpha_{k1}} \cdot x_2^{\alpha_{k2}} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_{kn}}, \quad \forall C_k > 0,$$

в которой  $\alpha_{kj}$  – любые действительные числа.

Задачи геометрического программирования ставятся только на минимум:

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{x}) &\rightarrow \min, \\ \varphi_i(\mathbf{x}) &\leq b_i, \\ \mathbf{x} &> 0. \end{aligned} \right\}$$

Такие задачи чаще возникают в конструкторских разработках. Для них разработаны специальные методы.

Пример 2.1. Спроектировать открытый контейнер с прямоугольными стенками и дном для перевозки из карьера гравия объемом  $V$ , если стоимость одной перевозки  $C$  не зависит от объема контейнера, а стоимость  $1\text{ м}^2$  дна равна  $a$ , передней и задней стенок –  $b$ , боковых стенок –  $d$ .

Пусть  $x$  – ширина,  $y$  – глубина и  $z$  – высота контейнера (рис.2.1).

Тогда целевая функция, суммарные затраты, запишется в виде

$$Z = \frac{V \cdot C}{x \cdot y \cdot z} + x \cdot y \cdot a + 2 \cdot x \cdot z \cdot b + 2 \cdot y \cdot z \cdot d \rightarrow \min.$$

Получили типичный позином. ▲

Кусочно-линейное программирование включает специальные методы решения задач с кусочно-линейными функциями. В частности, такими являются функции

$$f(\mathbf{x}) = \max_i f_i(\mathbf{x}) \text{ и } f(\mathbf{x}) = \min_i f_i(\mathbf{x}),$$

если все  $f_i(\mathbf{x})$  – линейные функции. Первая из них – выпуклая (рис. 2.2), вторая – вогнутая. Задачи с такими



Рис. 2.2

функциями могут входить в класс задач выпуклого программирования. Их решение строится на преобразовании модели к линейному виду с последующим применением методов ЛП.

К линейным сводятся также задачи дробно-линейного программирования. Они отличаются от линейных только дробной целевой функцией, числитель и знаменатель которой – линейные функции.

Условия оптимальности

Важным свойством задач НП является дифференцируемость функций критерия и ограничений. Для таких задач получены условия оптимальности, на основе которых строится ряд методов НП.

Пусть дана задача в виде

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{x}) &\rightarrow \max; \\ \varphi_i(\mathbf{x}) &\geq 0, \quad i = \overline{1, m_1}; \\ \psi_k(\mathbf{x}) &= 0, \quad k = \overline{1, m_2}; \\ \mathbf{x} &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Обобщенный метод множителей Лагранжа применим и к условиям-неравенствам. Запишем функцию Лагранжа (регулярную) для задачи (2.2)

$$F(\mathbf{X}, \Lambda) = f(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^{m_1} \lambda_i \varphi_i(\mathbf{X}) + \sum_{k=1}^{m_2} \lambda_k \psi_k(\mathbf{X}). \quad (2.3)$$

В теории НП показано, что эта функция имеет седловую точку  $(\mathbf{X}^*, \Lambda^*)$  с максимумом по  $\mathbf{X}$  и минимумом по  $\Lambda$ :

$$F(\mathbf{X}, \Lambda^*) \leq F(\mathbf{X}^*, \Lambda^*) \leq F(\mathbf{X}^*, \Lambda). \quad (2.4)$$

Поэтому задача (2.2) сводится к отысканию седловой точки функции (2.3).

**Теорема**

Пусть  $f$ ,  $\varphi_i$  и  $\psi_k$  – дифференцируемые функции и справедливо свойство Слейтера (то есть найдутся такие  $X \in D$ , что неравенства  $\varphi_i$  будут строгими).  $F(\mathbf{X}, \Lambda)$  – соответствующая функция Лагранжа.

Приведенные условия оптимальности называются условиями Куна-Таккера. Опуская строгое доказательство, приведем логическое обоснование выражений (2.5)-(2.9).

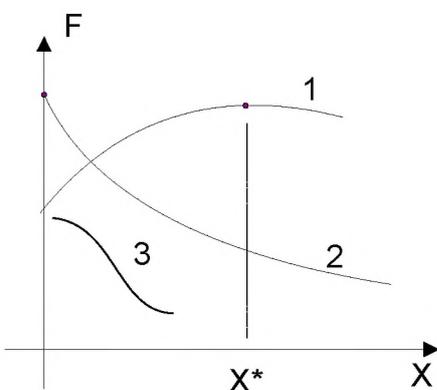
По существу, они являются обобщением классических условий экстремума, определяющих стационарные точки. Условие (2.5) содержит неравенство, так как неотрицательность вектора  $X$  означает, что максимум может быть либо при положительном  $X$  и тогда производная  $F$  по  $X$  обязательно равна нулю (случай 1 на рис. 2.3), либо при  $X=0$  и тогда эта производная может быть как равной нулю, так и отрицательной (случаи 2 и 3 на рис. 2.3). Этим же объясняются условия дополняющей нежесткости (2.6): в точке максимума равны нулю либо  $X$ , либо производная, либо вместе.

Выражения (2.7)-(2.9) можно обосновать аналогично, если учесть, что по  $\Lambda$  рассматривается минимум  $F$  и

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_i} = \varphi_i(\mathbf{X}^*), \quad \frac{\partial F}{\partial \lambda_k} = \psi_k(\mathbf{X}^*).$$

Применив условия Куна-Таккера к задаче ЛП, получим равенства второй основной теоремы двойственности как частный случай условий дополняющей нежесткости, а двойственные переменные – как частный случай  $\lambda$ .

Особую роль условия Куна-Таккера играют в



решении задач выпуклого программирования, так как для них они являются не только необходимыми, но и достаточными. В следующем разделе это свойство будет использовано для построения точного метода.

Квадратичное программирование

Задачи квадратичного программирования (КП) имеют место, если целевая функция – сумма линейной и квадратичной форм, а все условия линейные.

Например, в задаче с двумя переменными целевая квадратичная функция записывается следующим образом:

$$f(x_1, x_2) = \boxed{d_1x_1 + d_2x_2} + \boxed{\frac{1}{2}(C_{11}x_1^2 + C_{12}x_1x_2 + C_{21}x_1x_2 + C_{22}x_2^2)}.$$

↑  
линейная форма

↑  
квадратичная форма

В векторной форме она принимает вид

$$f(x_1, x_2) = [d_1, d_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \cdot [x_1, x_2] \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Обобщая на случай многих переменных, получаем:

$$f(\mathbf{X}) = \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{X} + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{X};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}.$$

Матрица  $\mathbf{C}$  – квадратная, диагонально-симметричная ( $C_{ij}=C_{ji}$ ).

В целом задача квадратичного программирования ставится в виде:

$$f(\mathbf{X}) = \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{X} + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \rightarrow \max; \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X} \geq 0; \quad (2.11)$$

$$\mathbf{X} \geq 0. \quad (2.12)$$

Чтобы она являлась задачей выпуклого программирования, целевая функция (2.10) должна быть вогнутой.

Свойства функции определяются матрицей  $\mathbf{C}$ . Для вогнутости функции необходимо, чтобы матрица  $\mathbf{C}$  была отрицательно определенной (строгая вогнутость) или отрицательно полуопределенной. Матрица  $\mathbf{C}$  отрицательно определенная, если для всех ненулевых  $\mathbf{X}$  справедливо  $\mathbf{X}^T\mathbf{C}\mathbf{X} < 0$ , и отрицательно полуопределенная, если  $\mathbf{X}^T\mathbf{C}\mathbf{X} \leq 0$ . В случае минимизации целевая функция должна быть выпуклой, что имеет место при положительно определенной или положительно полуопределенной матрице  $\mathbf{C}$ . Практически определить свойство квадратичной функции можно с помощью достаточных условий экстремума: если функция в стационарной точке имеет максимум, она вогнутая, а если минимум, то выпуклая.

Далее будем полагать, что условия вогнутости функции выполняются. Тогда решение задачи КП можно найти на основе следующей теоремы.

Теорема

Для того чтобы вектор  $\mathbf{X}^*$  являлся решением задачи (2.10)-(2.12), необходимо и достаточно существования таких неотрицательных  $m$ -мерных векторов  $\mathbf{W}$  и  $\mathbf{\Lambda}$  и неотрицательного  $n$ -мерного вектора  $\mathbf{V}$ , которые удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\mathbf{D} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}^* - \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{\Lambda} + \mathbf{V} = 0, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{B} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}^* - \mathbf{W} = 0, \quad (2.14)$$

$$V^T \cdot X^* = 0, \quad (2.15)$$

$$W^T \cdot \Lambda = 0. \quad (2.16)$$

Покажем, что теорема выводится из условий Куна-Таккера. Функция Лагранжа для рассматриваемой задачи имеет вид

$$F(X, \Lambda) = D^T \cdot X + \frac{1}{2} \cdot X^T \cdot C \cdot X + \Lambda^T \cdot (B - AX).$$

Записываем условия (2.5):

$$\frac{\partial F}{\partial X} = D + C \cdot X^* - A^T \Lambda \leq 0.$$

Введя в это неравенство неотрицательный вектор дополнительных переменных  $V$ , получаем (2.13). (2.14) – это исходное условие задачи после приведения его к равенству введением неотрицательного вектора дополнительных переменных  $W$ . Очевидно, что производная  $\frac{\partial F}{\partial X} < 0$ , когда дополнительная переменная  $V > 0$  и  $\frac{\partial F}{\partial X} = 0$ , когда  $V = 0$ .

Таким образом,  $V$  играет роль индикатора производной. Поэтому условие дополняющей нежесткости (2.6) принимает вид (2.15). Аналогична взаимосвязь вектора  $W$  с производной  $F$  по  $\Lambda$ , и отсюда имеем второе условие дополняющей нежесткости (2.16).

Система уравнений (2.13)-(2.16) – нелинейная, так как нелинейны (2.15) и (2.16). Она содержит  $(m + n + 2)$  уравнений и  $2 \cdot (m + n)$  неизвестных  $X^*$ ,  $\Lambda$ ,  $V$  и  $W$ .

Так как  $V^T X = \sum_{j=1}^n v_j \cdot x_j$  и векторы  $V$  и  $X$  неотрицательны, из (2.15) следует, что по крайней мере  $n$  переменных из  $v_j$  и  $x_j$  равны 0. Аналогично из (2.16) вытекает, что равны нулю не менее  $m$  переменных из  $w_i$  и  $\lambda_i$ . Таким образом, в решении системы (2.13)-(2.14) положительными могут быть не более  $(m + n)$  переменных. Это свойство системы дает ключ к решению.

Действительно, линейная система (2.13), (2.14) содержит  $n+m$  уравнений и  $2(n + m)$  неизвестных. Но известно, что в искомом решении число положительных переменных не превышает  $(m + n)$ . Следовательно, это допустимое базисное решение (опорный план) системы (2.13), (2.14). Поэтому искать решение задачи КП нужно только среди опорных планов этой системы. Такие решения находятся методами линейного программирования. Опорный план системы (2.13), (2.14), удовлетворяющий условиям (2.15), (2.16), будет оптимальным решением задачи КП.

Перепишем уравнения (2.13), (2.14) в обычном виде:

$$\begin{cases} C \cdot X^* - A^T \Lambda + V = -D, \\ A \cdot X^* + W = B. \end{cases} \quad (2.17)$$

Если вектор  $D$  – неположительный, а вектор  $B$  – неотрицательный, то начальное базисное решение  $V = -D$ ,  $W = B$  удовлетворяет условиям (2.15), (2.16) и, значит, является оптимальным решением задачи КП. Однако, как правило, вектор  $D$  имеет положительные компоненты и такое начальное решение оказывается недопустимым. В этом случае, ориентируясь на использование прямого симплекс-метода, строится искусственное начальное решение: в уравнения (2.17) с отрицательной правой частью вводятся искусственные переменные  $u_k$  и они вместе с неотрицательными  $v_j$  и  $w_i$  образуют базисное решение. В качестве критерия линейной задачи принимается сумма искусственных переменных:

$$L_{\text{иск}} = \sum u_k \rightarrow \min.$$

Для выполнения условий дополняющей нежесткости (2.15)-(2.16) алгоритм симплекс-метода дополняется правилом ограниченного ввода:

если в базисном решении имеется  $v_j$ , то не может вводиться  $x_j$  (с тем же индексом) и наоборот;

если в базисном решении имеется  $w_i$ , то не может вводиться  $\lambda_i$  (с тем же индексом) и наоборот.

Иначе говоря, в базисном решении не могут находиться одновременно переменные  $v, x$  ( $w, \lambda$ ) с одинаковыми индексами. Если по оценкам претендентом на ввод является переменная, которую согласно правилу нельзя вводить, в базисное решение вводится другая переменная с положительной оценкой.

Признаком выполнения условий теоремы (2.13)-(2.16) и, следовательно, оптимальности решения задачи КП является равенство нулю всех искусственных переменных или  $L_{иск}=0$ .

Очевидно, что рассмотренный метод находит за конечное число шагов глобальное решение задачи КП с вогнутой функцией цели. При строгой вогнутости задача имеет одно решение, при нестрогой вогнутости возможно множество решений. Если функция не является вогнутой, метод находит некоторый локальный максимум.

Пример 2.2. Найти решение следующей задачи КП:

$$\begin{aligned} f &= 10x_1 + 20x_2 + x_1 \cdot x_2 - 2x_1^2 - 2x_2^2 \rightarrow \max, \\ 8 - x_2 &\geq 0, \\ 9 - x_1 - x_2 &\geq 0, \\ x_1, x_2 &\geq 0. \end{aligned}$$

Перепише целевую функцию в векторной форме:

$$f = [10, 20] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \cdot [x_1, x_2] \cdot \begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

По матрице  $C$  (гессиану) проверяем достаточные условия:  $\Delta_1 = -4 < 0$ ,  $\Delta_2 = 16 - 2 > 0$ . Значит,  $f$  имеет максимум и строго вогнута.

Записываем первую систему уравнений (2.17):

$$\begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \end{bmatrix}$$

или

$$\begin{cases} -4x_1 + x_2 - \lambda_2 + V_1 = -10, \\ x_1 - 4x_2 - \lambda_1 - \lambda_2 + V_2 = -20. \end{cases}$$

Добавляем вторую:

$$\begin{cases} x_2 + W_1 = 8, \\ x_1 + x_2 + W_2 = 9. \end{cases}$$

Для образования начального базисного решения вводим в первую систему искусственные переменные  $y_1$  и  $y_2$ :

$$\begin{cases} 4x_1 - x_2 + \lambda_2 - V_1 + y_1 = 10, \\ -x_1 + 4x_2 + \lambda_1 + \lambda_2 - V_2 + y_2 = 20. \end{cases}$$

Критерий линейной задачи:

$$L_{иск} = y_1 + y_2 \rightarrow \min.$$

Базисные переменные в начальном решении:  $y_1, y_2, w_1$  и  $w_2$ .

Выполнив симплекс-преобразования с учетом правила ограниченного ввода, находим оптимальное решение задачи КП. На рис. 2.4 показано допустимое множество

задачи и линии уровня критерия. Оптимум достигается на границе допустимого множества в точке касания с линией уровня.

Этот пример показывает, что в задачах КП в отличие от линейного программирования оптимальное решение может находиться как в любой точке границы (не только в вершине), так и внутри допустимого множества в случае совпадения с безусловным максимумом.

В заключение отметим, что задача КП может использоваться в качестве аппроксимации при нелинейности критерия, отличной от квадратичной, так как в небольшой области гладкие функции с высокой точностью могут быть представлены квадратичной функцией. Ряд последовательных аппроксимаций с решением задачи КП позволяют найти решение исходной нелинейной задачи с необходимой точностью.

В сепарабельном программировании рассматриваются задачи, в которых целевая функция и все функции ограничений сепарабельны.

Напомним, что функция многих переменных сепарабельна, если она имеет вид суммы функций отдельных переменных:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m f_j(x_j). \quad (2.18)$$

Линейные функции всегда сепарабельны и поэтому линейное программирование можно рассматривать как частный случай сепарабельного.

Решение задач СП основано на преобразовании в задачи линейного программирования путем аппроксимации нелинейных функций кусочно-линейными. Таким образом, исходная нелинейная задача заменяется аппроксимирующей линейной. Поэтому рассматриваемый метод является приближенным, а точность решения напрямую зависит от точности аппроксимации и теоретически может быть сколь угодно высокой.

Существует два основных способа записи аппроксимирующей задачи, отличающихся формой представления исходных переменных: в  $\lambda$ - или в  $\delta$ -постановке.

$\lambda$  - постановка

Предполагается, что переменные, которые входят в модель нелинейно, ограничены снизу и сверху:

$$d_j \leq x_j \leq D_j. \quad (2.19)$$

Для кусочно-линейной аппроксимации в этом диапазоне выбираются узловые точки, чаще в той части, где сильнее нелинейность функции. При этом первый узел совпадает с нижней границей, а последний – с верхней:

$$X_{j1} = d_j, \quad X_{jr_{j+1}} = D_j,$$

где  $r_j$  – число интервалов по переменной  $x_j$  ( $r_j+1$  – число узлов). Тогда рассматриваемая переменная  $x_j$  может быть выражена через новые переменные  $\lambda_{jk}$  в виде

$$x_j = \sum_{k=1}^{r_j+1} X_{jk} \cdot \lambda_{jk}, \quad (2.20)$$

$$\sum_k \lambda_{jk} = 1, \quad (2.21)$$

$$\forall \lambda_{jk} \geq 0. \quad (2.22)$$

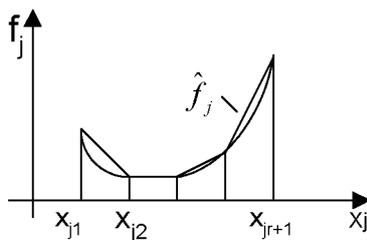


Рис. 2.5

Выражение (2.20) называют уравнением сетки. С учетом (2.21) и (2.22) оно представляет переменную  $x_j$  в диапазоне (2.19) без потери точности. С использованием узловых точек и новых переменных кусочно-линейная функция, аппроксимирующая  $f_j(x_j)$ , записывается в виде

$$\hat{f}_j = \sum_k f_j(X_{jk}) \cdot \lambda_{jk}, \quad (2.23)$$

где  $f_j(X_{jk})$  – значение функции в узловых точках (рис. 2.5). Очевидно, что  $\hat{f}_j$  – функция, линейная относительно  $\lambda_{jk}$ . Пусть  $N$  – множество индексов нелинейных  $f_j(x_j)$ . Тогда функция, аппроксимирующая  $f(X)$ , имеет вид

$$\hat{f}(X, \Lambda) = \sum_{j \in N} f_j(x_j) + \sum_{j \in N} \sum_k f_j(X_{jk}) \cdot \lambda_{jk}. \quad (2.24)$$

Итак, чтобы построить линейную аппроксимирующую модель, необходимо:

1. для каждой переменной, входящей нелинейно, записать уравнение сетки;
2. во всей модели заменить переменные из п.1, входящие в линейные  $f_j$ , соответствующими уравнениями сетки;
3. все функции, содержащие нелинейности, представить в виде (2.24);
4. добавить ограничения (2.21), (2.22) для всех новых переменных.

Если переменная  $x_j$  входит нелинейно в несколько функций, узлы сетки выбираются с учетом нелинейности всех таких функций, так как для одной переменной может быть только одно уравнение сетки.

Поясним запись ограничений. Пусть имеется исходное ограничение

$$\sum \varphi_{ij}(x_j) \leq b_i$$

со всеми нелинейными  $\varphi_{ij}$ . Тогда после аппроксимации оно принимает вид

$$\sum_j \sum_{k=1}^{r_j+1} \varphi_{ij}(X_{jk}) \cdot \lambda_{jk} \leq b_i.$$

В общем случае левая часть ограничения записывается аналогично (2.24).

Хотя аппроксимирующая задача линейная, получаемое на ней решение не всегда является приближением к решению исходной задачи. Дело в том, что одно и то же значение  $x_j$  можно получить по уравнению сетки при разных  $\lambda_{jk}$ , то есть представить через разные пары узлов. Например, некоторое значение  $x_j$  можно выразить через смежные узлы, в интервале которых находится значение, а можно через любую другую пару узлов, лежащих слева и справа, в том числе через первый и последний узел. Во всех случаях, кроме первого аппроксимация функции будет грубой и тем грубее, чем дальше отстоят узлы от данного значения  $x_j$ .

Отсюда следует правило смежных весов: из одного уравнения сетки отличными от нуля могут быть не более 2-х переменных  $\lambda_{jk}$  со смежными значениями  $k$ .

Если аппроксимирующая задача является задачей выпуклого программирования, то это правило выполняется автоматически и решение находится методом ЛП без каких-либо дополнений. Оптимальное решение аппроксимирующей задачи будет приближением глобального решения исходной задачи.

В противном случае алгоритм ЛП должен включать правило ограниченного ввода:

если в базисном решении находится  $\lambda_{jk}$ , то допустимыми для ввода могут быть только  $\lambda_{jk+1}$  или  $\lambda_{jk-1}$ .

При этом нельзя утверждать, что получаемое решение является приближением к глобальному оптимуму исходной задачи. Скорее оно будет приближением локального оптимума.

Свойства задачи зависят от всех функций модели:

1. Если все ограничения линейные, то для выпуклости задачи достаточно, чтобы были вогнутыми все  $f_j$  критерия (выпуклы при минимизации)
2. При нелинейности критерия и ограничений для выпуклости задачи должны быть вогнуты все  $f_j$  и выпуклы все  $\varphi_{ij}$ .

3. Если хотя бы одна  $f_j$  не вогнута при максимизации и/или одна  $\varphi_{ij}$  не выпукла, задача не является выпуклой.

Заметим, что, если все функции кусочно-линейные, переход к новым переменным не связан с потерей точности и при выполнении условий задач выпуклого программирования получаемое решение является точным и глобальным.

Пример 2.3. Задача

$$\begin{aligned} f &= 6x_1 - x_1^2 + 7x_2 \rightarrow \max, \\ 2x_1^2 - 5x_1 + 3x_2^2 &\leq 8, \\ 1 \leq x_1 < 4, \quad x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

является задачей сепарабельного программирования. Здесь

$$\begin{aligned} f_1(x_1) &= 6x_1 - x_1^2; \quad f_2(x_2) = 7x_2; \\ \varphi_{11}(x_1) &= 2x_1^2 - 5x_1; \quad \varphi_{12}(x_2) = 3x_2^2. \end{aligned}$$

Так как  $f_1(x_1)$  и  $f_2(x_2)$  – вогнутые, а  $\varphi_{11}(x_1)$  и  $\varphi_{12}(x_2)$  – выпуклые, имеем задачу выпуклого программирования. Обе переменные входят нелинейно, поэтому нужно строить две сетки. Оценим верхний предел  $x_2$ : находим  $\min \varphi_{11} = -3.125$ , затем из ограничения получаем максимально возможное значение  $x_2 = 1.93$ . Берем  $D_2 = 2$ . Пусть узловыми будут значения по  $x_1$ : 1, 2, 3, 4; по  $x_2$ : 0, 1, 2. Записываем уравнения сеток:  $x_1 = \lambda_{11} + 2\lambda_{12} + 3\lambda_{13} + 4\lambda_{14}$ ,  $x_2 = \lambda_{21} + 2\lambda_{22}$ . В итоге получаем модель аппроксимирующей задачи в виде

$$\begin{aligned} \hat{f} &= 5\lambda_{11} + 8\lambda_{12} + 9\lambda_{13} + 8\lambda_{14} + 7\lambda_{21} + 14\lambda_{22} \rightarrow \max, \\ -3\lambda_{11} - 2\lambda_{12} + 3\lambda_{13} + 12\lambda_{14} + 3\lambda_{21} + 12\lambda_{22} &\leq 8, \\ \lambda_{11} + 2\lambda_{12} + 3\lambda_{13} + 4\lambda_{14} &\geq 1, \\ \lambda_{11} + 2\lambda_{12} + 3\lambda_{13} + 4\lambda_{14} &\leq 4, \\ \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} &= 1, \\ \lambda_{21} + \lambda_{22} &= 1, \\ \forall \lambda_{jk} &\geq 0. \end{aligned}$$

Эта задача решается любым универсальным методом ЛП без добавления правила ограниченного ввода.

#### $\delta$ -постановка

Построение аппроксимирующей задачи основано так же на кусочно-линейном приближении, но меняется уравнение сетки. По узлам сетки вычисляются расстояния между смежными узлами (длины интервалов)

$$\delta_{jk} = X_{j,k+1} - X_{jk}$$

и уравнение сетки записывается в виде

$$x_j = d_j + \sum_{k=1}^{r_j} \delta_{jk} y_{jk}; \quad (2.25)$$

$$0 \leq y_{jk} \leq 1, \quad (2.26)$$

где  $y_{jk}$  – новые переменные.

Из представления переменной в виде (2.25), (2.26) следует:

- $x_j = d_j$ , когда  $\forall y_{jk} = 0$ ;
- $x_j$  находится в первом интервале, когда  $y_{j1} \in (0, 1)$ , остальные  $y_{jk} = 0$ ;
- $x_j$  находится во втором интервале, когда  $y_{j1} = 1$ ,  $y_{j2} \in (0, 1)$ , остальные  $y_{jk} = 0$ ;
- $x_j$  находится в  $k$ -ом интервале, когда  $y_{j1} = y_{j2} = \dots = y_{j,k-1} = 1$ ,  $0 \leq y_{jk} \leq 1$ , остальные  $y_{jk} = 0$ .

Таким образом, для правильной аппроксимации должно выполняться установленное соответствие между значениями переменной  $x_j$  и  $y_{jk}$ . Это требование аналогично правилу смежных весов. При ином представлении значения  $x_j$  будет нарушена кусочно-линейная аппроксимация функции.

Для аппроксимации нелинейной составляющей функции критерия вычисляются разности ее значений в смежных узлах

$$\Delta_{jk} = f_j(X_{jk+1}) - f_j(X_{jk}),$$

с помощью которых записывается аппроксимирующая функция

$$\hat{f}_j(Y_j) = f_j(d_j) + \sum_{k=1}^{r_j} \Delta_{jk} \cdot y_{jk}. \quad (2.27)$$

Тогда функция, аппроксимирующая критерий, имеет вид

$$\hat{f} = \sum_j \hat{f}_j(Y_j).$$

Аналогично аппроксимируются ограничения  $\varphi_{ij}(x_j)$ :

$$\Delta_{ijk} = \varphi_{ij}(x_{jk+1}) - \varphi_{ij}(x_{jk}),$$

$$\hat{\varphi}_{ij} = \varphi_{ij}(d_j) + \sum_{k=1}^{r_j} \Delta_{ijk} y_{jk}.$$

Как и в  $\lambda$ -постановке, если имеет место задача выпуклого программирования, то требования к переменным  $y_{jk}$  выполняются автоматически и полученное решение будет приближенным глобальным решением исходной задачи. В противном случае, необходимо придерживаться правила ограниченного ввода относительно переменных  $y_{jk}$ : если первые  $k$  переменных равны единице, вводить можно только  $y_{jk+1}$ .

При практическом решении сепарабельных задач сначала можно взять малое число узлов и получить приближенное оптимальное решение. Затем в качестве исходных принять интервалы, на которых лежат оптимальные  $x_j$ , и выполнить аппроксимацию функций только на этих интервалах с малыми расстояниями между узлами. Такой способ снижает размерность решаемых задач и повышает точность получаемого решения.

Следует заметить, что в ряде случаев несепарабельная функция может быть преобразована к сепарабельной. Способ преобразования зависит от структуры функции. Например, произведение двух сепарабельных функций  $S(X) \cdot T(X)$  можно привести к сепарабельному виду, заменив его переменной  $v$  с дополнительными равенствами

$$S(X) = z - y; \quad T(X) = z + y.$$

Тогда  $v = (z - y)(z + y) = z^2 - y^2$  – сепарабельная функция. Так функция  $f = x_1 + x_2 \cdot x_3^2$  заменяется на сепарабельную  $f = x_1 + v$  с дополнительными сепарабельными ограничениями

$$\begin{cases} x^2 - (z - y) = 0; \\ x_3^2 - (z + y) = 0; \\ v - z^2 + y^2 = 0. \end{cases}$$

**Пример 2.4.** Покажем, что некоторые стохастические задачи могут сводиться к сепарабельным. Стохастические модели описывают ситуации выбора решения в условиях риска, обусловленного влиянием случайных факторов. Предполагается, что закон распределения случайных величин известен.

Пусть зависимости от искомым переменных линейны, но коэффициенты критерия и ограничений зависят от случайной величины  $\omega$  (состояния среды). В этом случае в качестве критерия берется обычно математическое ожидание линейной формы  $M(L) = M[C^T(\omega)X] = \bar{C}^T X$ , а запись ограничений зависит от требований к их выполнению. При допустимости некоторых нарушений условий задачи ограничения записываются в вероятностной форме:

$$P\left[\sum a_{ij}(\omega)x_j \leq b_i(\omega)\right] \geq p_i, \quad i = \overline{1, m}.$$

где  $p_i$  - заданное значение вероятности. выполнения  $i$ -го условия. Такое ограничение заменяется эквивалентным детерминированным условием

$$\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j + t_{p_i} \sqrt{\sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_j^2 + \sigma_i^2} \leq \bar{b}_i, \quad (*)$$

где  $\bar{a}_{ij}, \bar{b}_i$  - математические ожидания,  $\sigma_{ij}$  - дисперсия  $a_{ij}$ ,  $\sigma_i$  - дисперсия  $b_i$ ,  $t_{p_i} = t(p_i)$  - значение функции, обратной функции распределения (например, нормального).

В результате детерминированная модель стохастической задачи включает линейный критерий и существенно нелинейные ограничения (\*). Очевидно, что она не является сепарабельной. Сделаем простое преобразование. Обозначим

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_j^2 + \sigma_i^2}.$$

Тогда каждое ограничение (\*) заменяется двумя условиями:

$$\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j + t_{p_i} S_i \leq \bar{b}_i,$$

$$S_i^2 - \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_j^2 - \sigma_i^2 = 0.$$

Первое из них - линейное, а второе - сепарабельное. Таким образом, стохастическая задача приведена к сепарабельной.

Примечание. Если случайным является только вектор ограничений, то, как следует из (\*), стохастическая задача сводится к линейной.

## 2.6. Прикладные аспекты оптимального распределения ресурсов

(практическая работа)

Простейшим способом принятия решений в подобных ситуациях является присвоение критериям, определяющим качество решения, весовых коэффициентов и вычисление для альтернативных решений оценок по числовой шкале, например от 1 (наихудшее) до 10 (наилучшее), путем суммирования произведений значений каждого критерия на его весовой коэффициент. Решение с наивысшей суммой в этом случае является наиболее предпочтительным. Такой метод выбора решения назовём методом ранжирования по приоритетам.

Рассмотрим пример, в котором необходимо выбрать компьютер для офиса. Выбор осуществляется среди трех моделей:

1. Модель А с процессором AMD Phenom II X4 980 с частотой 3700 МГц;
2. Модель Б с процессором Intel Core i3-2120 с частотой 3300 МГц;
3. Модель В с процессором Intel Core i5-2320 с частотой 3000 МГц;

При выборе будем учитываться следующие критерии:

- Цена;
- Эффективность (предположим, что частота процессора отражает эффективность компьютера);
- Ёмкость жесткого диска;
- Срок гарантийного ремонта.

Далее требуется решить, какие весовые коэффициенты должны принимать разные критерии. Примем следующие веса критериев: цена — 0,40 (50% общего веса); эффективности — 0,25 (15%); ёмкость жесткого диска — 0,20 (20%) и гарантийный срок — 0,15 (15% общего веса). После назначения весов критериев должна быть произведена оценка каждой модели компьютера по всем четырем критериям. Их оценки по шкале от 1 до 10 (как описывалось выше) показаны в табличной модели (см. Рисунок , Рисунок .2)

	A	B	C	D	E
1	<b>Сравнение компьютеров</b>				
2			<b>Ранги альтернатив</b>		
3	<b>Веса критериев</b>		Модель А	Модель Б	Модель В
4	Цена	40,0%	5	8	8
5	Эффективность	25,0%	8	6	6
6	Объём ПЗУ	20,0%	7	6	9
7	Срок гарантии	15,0%	6	6	8
8			6,3	6,8	7,7
9					
10		Цена	Процессор	Объём ПЗУ	Срок гарантии
11	Модель А	36 900,30р.	3700 МГц, x4	750 Гб	3 года
12	Модель Б	30 711,00р.	3300 МГц, x2	600 Гб	3 года
13	Модель В	31 138,00р.	3000 МГц, x4	1 Тб	4 года

Рисунок 2.1 Модель принятия решения при сравнении компьютеров

	A	B	C	D	E
1	<b>Сравнение компьютеров</b>				
2			<b>Ранги альтернатив</b>		
3	<b>Веса критериев</b>		Модель А	Модель Б	Модель В
4	Цена	0,4	5	8	8
5	Эффективность	0,25	8	6	6
6	Объём ПЗУ	0,2	7	6	9
7	Срок гарантии	0,15	6	6	8
8			=СУММПРОИЗВ(B4:B7;C4:C7)	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;D4:D7)	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;E4:E7)
9					
10		Цена	Процессор	Объём ПЗУ	Срок гарантии
11	Модель А	36900,3	3700 МГц, x4	750 Гб	3 года
12	Модель Б	30711	3300 МГц, x2	600 Гб	3 года
13	Модель В	31138	3000 МГц, x4	1 Тб	4 года

Рисунок 2.2 Модель принятия решения при сравнении компьютеров (с формулами)

Как видно из примера, наибольшую сумму баллов 7,7 набрала модель В, поэтому купить следует именно ее.

Метод рейтинга приоритетов прост в использовании, однако при его применении на практике возникает ряд сложностей (при задании оценочных шкал для разнородных критериев, при выставлении оценок альтернативам), преодолеть которые можно при помощи более совершенного метода, такого как метода анализа иерархий (англ. Analytic hierarchy process).

Использование метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий (МАИ) также основан на использовании взвешенных средних, однако в нем применяется более надежный и согласованный метод присвоения оценок и весовых коэффициентов. МАИ основывается на попарном сравнении альтернативных решений по каждому критерию. Затем проводится аналогичный ряд сравнений, чтобы оценить относительную важность каждого критерия и таким образом определить весовые коэффициенты. Основная процедура состоит из следующих этапов:

1. Определяются рейтинги альтернатив по каждому критерию:
  - 1.1. Создаётся матрица попарных сравнений по всем критериям;
  - 1.2. Полученная матрица нормализуется;
  - 1.3. Для получения соответствующих рейтингов усредняются значения в каждой строке;
  - 1.4. Вычисляются и проверяются коэффициенты согласованности;
2. Определяются весовые коэффициенты критериев:
  - 2.1. Создается матрица попарных сравнений по всем критериям;
  - 2.2. Полученная матрица нормализуется;
  - 2.3. Для получения весовых коэффициентов усредняются значения в каждой строке;
  - 2.4. Вычисляются и проверяются коэффициенты согласованности;

3. Вычисляется взвешенный средний рейтинг для каждой альтернативы и выбирается решение, набравшее наибольшее количество баллов.

Продемонстрируем применение данной процедуры на примере. Сети кафе «Петровские кофейни» нужно выбрать наилучший пакет программного обеспечения для приёма заказов из предлагаемых несколькими поставщиками. Эта задача была поручена заведующему отделу обслуживания клиентов Скобину Николаю Петровичу. Он выделил трех поставщиков, предлагаемое программное обеспечение которых сможет удовлетворить основные потребности компании Reservation Technologies (RT), «ИТ-Техностар» (ИТТ) и «Норд-Консалтинг» (НК). Критерии, которые он считает важными в выборе программного обеспечения:

- А. Общая стоимость программного пакета;
- Б. Наличие сервисного обслуживания на протяжении следующего года;
- В. Эргономичность графических интерфейсов пользователя;
- Г. Возможность адаптации системы под бизнес-процесс «Петровских кофеен».

#### **Определение рейтинга альтернатив по каждому критерию**

Первый шаг процедуры МАИ состоит в попарном сравнении продавцов по каждому критерию. Для этого используем стандартную шкалу сравнения, которую содержит 1.

Таблица 1. Шкала сравнения альтернатив по критериям

<b>Ранг</b>	<b>Описание</b>
1	Одинаковое предпочтение
3	Умеренное предпочтение
5	Явное предпочтение
7	Очевидное предпочтение
9	Абсолютное предпочтение

Также можно присваивать значения рейтинга 2, 4, 6 и 8, которые определяются как средние от ближайших рейтингов.

Николай Петрович начал с первого критерия (общая стоимость) и внес в лист «Стоимость» рабочей книги «ЛР2.Пример2.xls» данные. Таблицу следует читать таким образом: указанный в строке поставщик сравнивается с поставщиком, указанным в столбце. Если указанный в строке поставщик предпочтительней, то соответствующее число от 1 до 9 записывается в ячейку на пересечении строки и столбца. Если же предпочтительней поставщик, указанный в столбце, то 1 делится на соответствующее число от 1 до 9, и результат записывается в ячейку на пересечении строки и столбца. Очевидно, что поскольку любой поставщик одинаково предпочтителен по сравнению с самим собой, то во все ячейки главной диагонали заносится значение 1.

Использование МАИ. Сравнение альтернатив по стоимости					
Попарное сравнение					
	RT	ИТТ	НК		
RT	1,000	4,000	0,500		
ИТТ	0,250	1,000	0,143		
НК	2,000	7,000	1,000		
<b>Сумма</b>	<b>3,250</b>	<b>12,000</b>	<b>1,643</b>		
Нормализация					
	RT	ИТТ	НК	Среднее	Мера согласованности
RT	0,308	0,333	0,304	0,315	3,002
ИТТ	0,077	0,083	0,087	0,082	3,000
НК	0,615	0,583	0,609	0,602	3,004
Согласованность					
ИС	ИР	Коэф. Согласованности			
0,001	0,580	0,002			

Рисунок 1.3. Попарное сравнение по стоимости

По показателю общей стоимости поставщику RT отдается среднее между умеренным и явным предпочтение в сравнении с поставщиком ИТТ. Поэтому в ячейку второго столбца первой строки заносится число 4 (ячейка C4). Поставщику НК отдается предпочтение от одинакового до умеренного перед поставщиком RT, поэтому в ячейке третьего столбца первой строки записано число 1/2 (ячейка D4). Скобин так запрограммировал свою таблицу, что после ввода элементов справа от диагонали (ячейки C4, D4 и D5) обратные предпочтения вычисляются автоматически. Например, поскольку при сравнении поставщика RT с поставщиком ИТТ было записано 4, то при обратном сравнении поставщика ИТТ с поставщиком RT автоматически получается 1/4 (ячейка B5).

Использование МАИ. Сравнение альтернатив по стоимости					
Попарное сравнение					
	RT	ИТТ	НК		
RT	1	4	0,5		
ИТТ	=1/C4	1	=1/7		
НК	=1/D4	=1/D5	1		
<b>Сумма</b>	<b>=СУММ(B4:B6)</b>	<b>=СУММ(C4:C6)</b>	<b>=СУММ(D4:D6)</b>		
Нормализация					
	RT	ИТТ	НК	Среднее	Мера согласованности
RT	=B4/B\$7	=C4/C\$7	=D4/D\$7	=СУММ(B11:D11)/3	=МУМНОЖ(B4:D4;E\$11:E\$13)/E11
ИТТ	=B5/B\$7	=C5/C\$7	=D5/D\$7	=СУММ(B12:D12)/3	=МУМНОЖ(B5:D5;E\$11:E\$13)/E12
НК	=B6/B\$7	=C6/C\$7	=D6/D\$7	=СУММ(B13:D13)/3	=МУМНОЖ(B6:D6;E\$11:E\$13)/E13
Согласованность					
ИС	ИР	Коэф. Согласованности			
=СРЗНАЧ(F11:F13)	0,58	=A17/B17			

Рисунок 2.4. Попарное сравнение по стоимости (с формулами)

После выполнения всех попарных сравнений матрицу необходимо нормализовать. Это выполняется путем суммирования чисел в каждом столбце и последующего деления каждого элемента столбца на полученную для данного столбца сумму. Результаты данной операции представлены в ячейках B11:D13.

Следующим шагом требуется вычислить балл для каждого продавца по критерию общей стоимости. Эти значения показаны в столбце . Видно, что наивысший средний балл по данному критерию имеет поставщик НК.

Завершив нормализацию матрицы, необходимо вычислить коэффициент согласованности и проверить его значение. Цель этой операции состоит в том, чтобы убедиться в согласованности задания предпочтений в исходной таблице. Например, если

по критерию общей стоимости задана явная предпочтительность поставщика RT перед поставщиком ИТТ и умеренная предпочтительность поставщика ИТТ по сравнению с поставщиком НК, то при сравнении поставщиков RT и НК задание одинаковой предпочтительности приведет к несогласованности, еще большая несогласованность возникнет при указании, что НК предпочтительней RT

<b>RT</b>	<b>&gt;</b>	<b>ИТТ</b>
<b>ИТТ</b>	<b>&gt;</b>	<b>НК</b>
<b>НК</b>	<b>&gt;</b>	<b>RT (!)</b>

Вычисление коэффициента согласованности состоит из трех этапов.

1. Вычисляется мера согласованности для каждой альтернативы;
2. Определяется индекс согласованности (ИС).
3. Вычисляется коэффициент согласованности, как отношение ИС/ИР, где ИР — индекс рандомизации.

Для вычисления меры согласованности в MS Excel можно воспользоваться функцией умножения матриц МУМНОЖ. Как показывают Рисунок 1 и Рисунок 2, для поставщика RT средний рейтинг каждого поставщика (ячейки E11:E13) умножается на соответствующее количество баллов в первой строке сравнения (ячейки B4:D4), эти произведения суммируются, и сумма делится на средний рейтинг первого поставщика (ячейка E11). Аналогичные вычисления осуществляются для альтернатив ИТТ и НК. В идеальном случае меры согласованности должны быть равны числу возможных альтернатив (в рассматриваемом случае — 3). Для вычисления индекса согласованности определяется средняя мера согласованности всех трех альтернатив, из нее вычитается количество альтернатив  $n$  и результат делится на  $(n-1)$ . Индекс согласованности ИС показывает Рисунок 1 в ячейке A17, его значение равно 0,001. Последний этап определения коэффициента согласованности заключается в делении ИС на индекс рандомизации ИР, значения которого для различных значений  $n$  вычисляются в методе МАИ специальным образом, как индекс согласованности для кососимметрических матриц. Значения для использования в работе приведены в таблице ниже (см. Таблица 1).

Таблица 1. Значения индекса рандомизации

<b>n</b>	<b>Значение индекса рандомизации</b>
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,51

Коэффициент согласованности сравнения по критерию стоимости записан в ячейке C17 и равен 0,002.

В случае абсолютной согласованности предпочтений мера согласованности будет равна 3, следовательно, ИС будут равны нулю, и коэффициент согласованности также будет равен нулю. Если этот коэффициент слишком велик (больше 0,10 по оценке Саати), значит, менеджер был недостаточно последователен в своих оценках, поэтому следует вернуться назад и пересмотреть результаты попарных сравнений (в большинстве случаев

обнаруживается элементарная ошибка, и коэффициент согласованности сигнализирует о ее наличии).

После сравнения по стоимости аналогичные сравнения должны быть произведены по остальным трём критериям. Это можно сделать, трижды скопировав рабочий лист «Стоимость», создав тем самым три новых рабочих листа, а затем надо просто изменить параметры попарных сравнений. Во всех случаях значения коэффициента согласованности заключены в пределах от 0 до 0,047, это означает, что Николай Петрович был достаточно последователен в своих оценках. Кроме того, можно заметить, что компания ИТТ оказалась лучшей по критерию обслуживания, RT и ИТТ — лучшие по критерию сложности, а ИТТ — лучшая по критерию адаптируемости.

	A	B	C	D	E	F
1	<b>Использование МАИ. Сравнение альтернатив по обслуживанию</b>					
2	<b>Попарное сравнение</b>					
3		RT	ИТТ	НК		
4	RT	1,000	0,500	6,000		
5	ИТТ	2,000	1,000	8,000		
6	НК	0,167	0,125	1,000		
7	<b>Сумма</b>	<b>3,167</b>	<b>1,625</b>	<b>15,000</b>		
8						
9	<b>Нормализация</b>					
10		RT	ИТТ	НК	Среднее	Мера согласованности
11	RT	0,316	0,308	0,400	0,341	3,020
12	ИТТ	0,632	0,615	0,533	0,593	3,032
13	НК	0,053	0,077	0,067	0,065	3,003
14						
15	<b>Согласованность</b>					
16	<b>ИС</b>	<b>ИР</b>	<b>Козф. Согласованности</b>			
17	0,009	0,580	0,016			

	A	B	C	D	E	F
1	<b>Использование МАИ. Сравнение альтернатив по эргономичности</b>					
2	<b>Попарное сравнение</b>					
3		RT	ИТТ	НК		
4	RT	1,000	1,000	5,000		
5	ИТТ	1,000	1,000	5,000		
6	НК	0,200	0,200	1,000		
7	<b>Сумма</b>	<b>2,200</b>	<b>2,200</b>	<b>11,000</b>		
8						
9	<b>Нормализация</b>					
10		RT	ИТТ	НК	Среднее	Мера согласованности
11	RT	0,455	0,455	0,455	0,455	3,000
12	ИТТ	0,455	0,455	0,455	0,455	3,000
13	НК	0,091	0,091	0,091	0,091	3,000
14						
15	<b>Согласованность</b>					
16	<b>ИС</b>	<b>ИР</b>	<b>Козф. Согласованности</b>			
17	0,000	0,580	0,000			

	A	B	C	D	E	F
1	<b>Использование МАИ. Сравнение альтернатив по адаптируемости</b>					
2	<b>Попарное сравнение</b>					
3		RT	ИТТ	НК		
4	RT	1,000	0,250	3,000		
5	ИТТ	4,000	1,000	6,000		
6	НК	0,333	0,167	1,000		
7	<b>Сумма</b>	<b>5,333</b>	<b>1,417</b>	<b>10,000</b>		
8						
9	<b>Нормализация</b>					
10		RT	ИТТ	НК	Среднее	Мера согласованности
11	RT	0,188	0,176	0,300	0,221	3,040
12	ИТТ	0,750	0,706	0,600	0,685	3,109
13	НК	0,063	0,118	0,100	0,093	3,013
14						
15	<b>Согласованность</b>					
16	<b>ИС</b>	<b>ИР</b>	<b>Козф. Согласованности</b>			
17	0,027	0,580	0,047			

Рисунок 3 Попарное сравнение по адаптируемости

### Определение весовых коэффициентов критериев

На втором этапе должны быть осуществлены аналогичные попарные сравнения для определения весов критериев. Процесс аналогичен сравнению альтернатив по критериям, однако в данном случае сравниваются между собой критерии. Эти действия в рассматриваемом примере выполняются на рабочем листе Веса.

Использование МАИ. Сравнение альтернатив по адаптируемости						
Попарное сравнение						
	Стоимость	Обслуживание	Эргономичность	Адаптируемость		
Стоимость	1,000	6,000	0,500	3,000		
Обслуживание	0,167	1,000	0,125	0,333		
Эргономичность	2,000	8,000	1,000	5,000		
Адаптируемость	0,333	3,000	0,200	1,000		
Сумма	3,500	18,000	1,825	9,333		
Нормализация						
	Стоимость	Обслуживание	Эргономичность	Адаптируемость	Среднее	Мера согласованности
Стоимость	0,286	0,333	0,274	0,321	0,304	4,071
Обслуживание	0,048	0,056	0,068	0,036	0,052	4,011
Эргономичность	0,571	0,444	0,548	0,536	0,525	4,087
Адаптируемость	0,095	0,167	0,110	0,107	0,120	4,023
Согласованность						
ИС	ИР	Коэф. Согласованности				
0,019	0,900	0,021				

Рисунок 2.6 Коэффициент согласованности для весов критериев

Оказалось, что показатель эргономичности имеет наибольший вес (0,525 в ячейке F14), за ним идет стоимость (0,304 в ячейке F12). Меры согласованности оказались близки к 4, поэтому индекс согласованности и коэффициент согласованности близки к нулю.

Последний шаг состоит в вычислении взвешенных средних оценок для каждого варианта решения и применении полученных результатов для принятия решения о том, у какого поставщика будет куплено новое программное обеспечение.

Итоговый выбор альтернативы

Заключительные вычисления сделаны на листе Выбор. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что компания RT с показателем 0,378 (ячейка C8) несколько превосходит компанию ИТТ, имеющую показатель 0,376 (ячейка D8), а компания НК от них заметно отстала, имея показатель 0,245.

Использование МАИ. Итоговый выбор альтернативы				
Результаты сравнения				
	Весы	RT	ИТТ	НК
Стоимость	0,304	0,315	0,082	0,602
Обслуживание	0,052	0,341	0,593	0,065
Эргономичность	0,525	0,455	0,455	0,091
Адаптируемость	0,120	0,221	0,685	0,093
	Взвешенные оценки	0,378	0,376	0,245

Рисунок 2.7. Итоговый выбор альтернативы

Использование МАИ. Итоговый выбор альтернативы				
Результаты сравнения				
	Весы	RT	ИТТ	НК
Стоимость	=Весы!F12	=Стоимость!E11	=Стоимость!E12	=Стоимость!E13
Обслуживание	=Весы!F13	=Обслуживание!E11	=Обслуживание!E12	=Обслуживание!E13
Эргономичность	=Весы!F14	=Эргономичность!E11	=Эргономичность!E12	=Эргономичность!E13
Адаптируемость	=Весы!F15	=Адаптируемость!E11	=Адаптируемость!E12	=Адаптируемость!E13
	Взвешенные оценки	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;C4:C7)	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;D4:D7)	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;E4:E7)

Рисунок 2.8 Итоговый выбор альтернативы (с формулами)

Таким образом происходит определение итоговой альтернативы.

## 2.7. Определение вида и способа представления объекта управления (практическая работа)

Для получения комплексных передаточных коэффициентов объекта (системы) были проведены шесть опытов. Комплексные передаточные коэффициенты искались, согласно, в следующем виде:

$$a_{i,j}(p) = \frac{k_{i,j}}{T_{i,j}s + 1} \cdot e^{-s \cdot \tau_{i,j}} \quad (3.1)$$

где  $k_{i,j}$  – коэффициент усиления,  $T_{i,j}$  – постоянные времени объекта,  $\tau_{i,j}$  – постоянные времени запаздывания объекта,  $s$  – оператор Лапласа, где  $i$  – индекс канала в котором происходит возмущающее воздействие  $j$  – индекс канала на который воздействует возмущающее воздействие.

Исследование объекта проводилось следующим образом. Сначала на все каналы объекта подавался постоянный сигнал мощность двадцать процентов от номинальной мощности. Затем по достижению установившегося температурного режима поочередно на каждый вход ( $i$ ) объекта (системы) подавался возмущающий постоянный сигнал мощность тридцать процентов от номинальной мощности, и на всех выходах ( $j$ ) получали графики переходных процессов, из которых определялись параметры объекта ( $k_{i,j}$ ,  $T_{i,j}$ ,  $\tau_{i,j}$ ). Эти параметры определяются с использованием графиков переходных процессов (см. рис. 3.1).

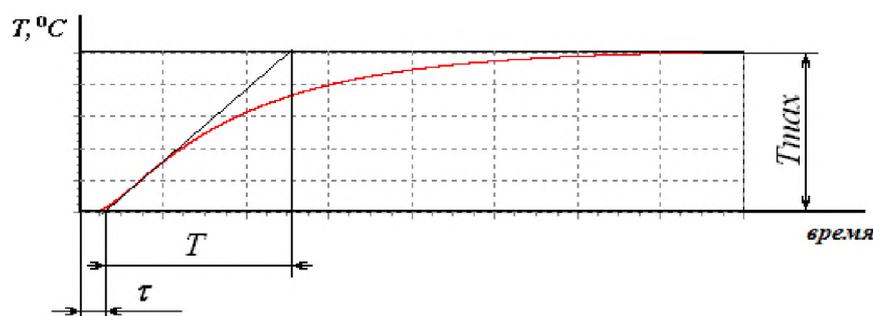


Рис. 3.1 Определение параметров объекта.

По окончании переходного процесса во всех каналах, система охлаждалась до установившегося температурного режима, который был до начала переходного процесса.

Регистрация производилась с помощью среды программирования «CoDeSys», поставляемого фирмой «Owen» совместно с программируемым логическим контролером (ПЛК). Параметры объекта определялись по следующим формулам:

$$k_{i,j} = \frac{T_{ni,j} - T_{ki,j}}{\Delta P_i}; \quad (3.2)$$

где  $k_{i,j}$  – коэффициенты усиления по соответствующим каналам,

$T_{ni,j}$  – температура в начале переходного процесса,

$T_{ki,j}$  – температура в конце переходного процесса,

$\Delta P_i$  – изменение мощности зоны нагрева при возмущении по соответствующему каналу управления.

Параметры  $T_{i,j}$ ,  $\tau_{i,j}$  определялись в соответствии с рисунком показанным выше. Программный комплекс «CoDeSys» позволяет регистрировать результаты испытаний с использованием цифровой фильтрации сигнала, с частотой опроса аналогового модуля ввода аналогового (МВА-8) равным 0.2 секунды, и проводить отсчет времени в реальном масштабе времени.

Результаты испытаний сведены в таблицу 3.1, которая приводится ниже. На рис. 3.2-3.19 показаны графики температуры переходных процессов во время испытаний. Цифрами соответственно обозначены зоны: 1 – первая зона туннельной печи; 2 – вторая зона туннельной печи; 3 – третья зона туннельной печи.

### Оборудование и материалы.

Туннельная печь, с 3-мя зонами нагрева, ОВЕН ПЛК150-УЛ, МВУ- модуль вывода управляющих сигналов, МВА- модуль ввода аналоговых сигналов, БУСТ - блок управления семисторами тиристорами 3шт., ПЧ –преобразователь частоты для управления асинхронным приводом датчики положения задвижек -2шт., датчики оптические на входе и выходе печи, система подготовки воздуха с системой стабилизации давления на ЭКМ.

### Ход работы

1. Запустить программу испытания печи на лабораторном стенде.
- 2.. Снять экспериментальные данные переходного процесса, используя лабораторный стенд.
3. По экспериментальным данным определить параметры переходного процесса и заполнить таблицу вида 1

Таб.1

Характеристика объекта	Номер опыта			
	1	2	3	4
$\kappa_{11}$ (град / Вт)				
$\kappa_{12}$ (град / Вт)				
$\kappa_{13}$ (град / Вт)				
$\kappa_{21}$ (град / Вт)				
$\kappa_{22}$ (град / Вт)				
$\kappa_{23}$ (град / Вт)				
$\kappa_{31}$ (град / Вт)				
$\kappa_{32}$ (град / Вт)				
$\kappa_{33}$ (град / Вт)				
$T_{11}$ (сек)				
$T_{12}$ (сек)				
$T_{13}$ (сек)				
$T_{21}$ (сек)				

$T_{22}$ (сек)				
$T_{23}$ (сек)				
$T_{31}$ (сек)				
$T_{32}$ (сек)				
$T_{33}$ (сек)				
$\tau_{11}$ (сек)				
$\tau_{12}$ (сек)				
$\tau_{13}$ (сек)				
$\tau_{21}$ (сек)				
$\tau_{22}$ (сек)				

**2.8. Особенности применения моделей массового обслуживания, работа с программой для ЭВМ № 2014662876 «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов», правообладатель Санкт-Петербургской горный университет  
(практическая работа)**

Системы массового обслуживания — это такие системы, в которые в случайные моменты времени поступают заявки на обслуживание, при этом поступившие заявки обслуживаются с помощью имеющихся в распоряжении системы каналов обслуживания.

С позиции моделирования процесса массового обслуживания ситуации, когда образуются очереди заявок (требований) на обслуживание, возникают следующим образом. Поступив в обслуживающую систему, требование присоединяется к очереди других (ранее поступивших) требований. Канал обслуживания выбирает требование из находящихся в очереди, с тем, чтобы приступить к его обслуживанию. После завершения процедуры обслуживания очередного требования канал обслуживания приступает к обслуживанию следующего требования, если таковое имеется в блоке ожидания.

Цикл функционирования системы массового обслуживания подобного рода повторяется многократно в течение всего периода работы обслуживающей системы. При этом предполагается, что переход системы на обслуживание очередного требования после завершения обслуживания предыдущего требования происходит мгновенно, в случайные моменты времени.

Примерами систем массового обслуживания могут служить:

- посты технического обслуживания автомобилей;
- посты ремонта автомобилей;
- станции технического обслуживания автомобилей;
- аудиторские фирмы;
- телефонные станции и т. д.

Основными компонентами системы массового обслуживания любого вида являются:

- входной поток поступающих требований или заявок на обслуживание;
- дисциплина очереди;
- механизм обслуживания.

В качестве основных критериев эффективности функционирования систем массового обслуживания в зависимости от характера решаемой задачи могут выступать:

- вероятность немедленного обслуживания поступившей заявки;
- вероятность отказа в обслуживании поступившей заявки;
- относительная и абсолютная пропускная способность системы;
- средний процент заявок, получивших отказ в обслуживании;
- среднее время ожидания в очереди;
- средняя длина очереди;
- средний доход от функционирования системы в единицу времени и т.п.

Предметом теории массового обслуживания является установление зависимости между факторами, определяющими функциональные возможности системы массового обслуживания, и эффективностью ее функционирования. В большинстве случаев все параметры, описывающие системы массового обслуживания, являются случайными величинами или функциями, поэтому эти системы относятся к стохастическим системам.

Случайный характер потока заявок (требований), а также, в общем случае, и длительности обслуживания приводит к тому, что в системе массового обслуживания происходит случайный процесс. По характеру случайного процесса, происходящего в системе массового обслуживания (СМО), различают системы марковские и немарковские. В марковских системах входящий поток требований и выходящий поток обслуженных требований (заявок) являются пуассоновскими.

Пуассоновские потоки позволяют легко описать и построить математическую модель системы массового обслуживания. Данные модели имеют достаточно простые решения, поэтому большинство известных приложений теории массового обслуживания используют марковскую схему. В случае немарковских процессов задачи исследования систем массового обслуживания значительно усложняются и требуют применения статистического моделирования, численных методов с использованием ЭВМ.

Независимо от характера процесса, протекающего в системе массового обслуживания, различают два основных вида СМО:

- системы с отказами, в которых заявка, поступившая в систему в момент, когда все каналы заняты, получает отказ и сразу же покидает очередь;
- системы с ожиданием (очередью), в которых заявка, поступившая в момент, когда все каналы обслуживания заняты, становится в очередь и ждет, пока не освободится один из каналов.

Системы массового обслуживания с ожиданием делятся на системы с ограниченным ожиданием и системы с неограниченным ожиданием.

В системах с ограниченным ожиданием может ограничиваться:

- длина очереди;
- время пребывания в очереди.

В системах с неограниченным ожиданием заявка, стоящая в очереди, ждет обслуживания неограниченно долго, т.е. пока не подойдет очередь.

Все системы массового обслуживания различают по числу каналов обслуживания:

- одноканальные системы;
- многоканальные системы.

Приведенная классификация СМО является условной. На практике чаще всего системы массового обслуживания выступают в качестве смешанных систем. Например, заявки ожидают начала обслуживания до определенного момента, после чего система начинает работать как система с отказами.

При моделировании реальных систем с дискретными процессами достаточно широкое применение находят базовые модели в виде СМО, которые могут быть классифицированы (рис. 2.1):

- по числу мест в накопителе;

- числу обслуживающих приборов;
- количеству классов заявок, поступающих в СМО;
- надежности.

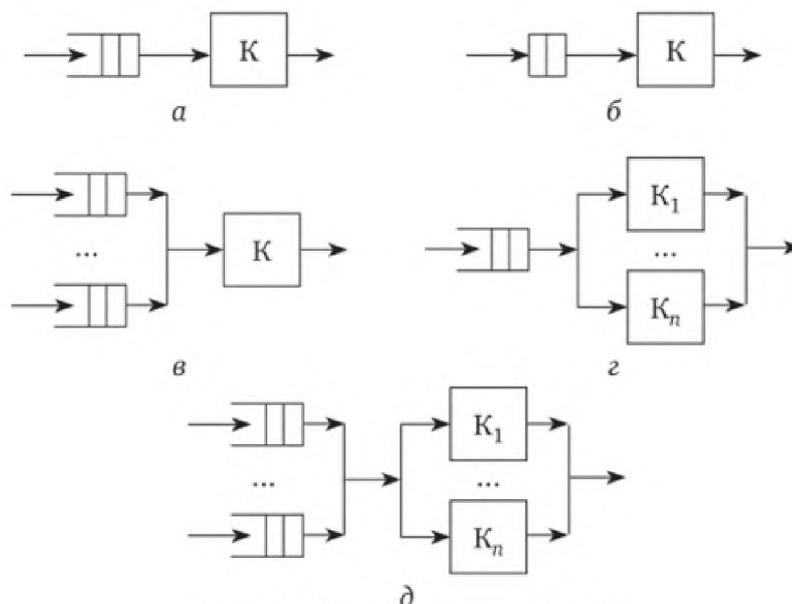


Рис. 2.1. Базовые модели СМО

1. По числу мест в накопителе СМО делятся на системы:

- без накопителя (СМО с отказами), в которых заявка, поступившая на вход системы и заставшая все приборы занятыми обслуживанием заявок более высоких приоритетов, получает отказ и теряется;
- с накопителем ограниченной емкости (СМО с потерями) (рис. 2.1, б), в которых поступившая на вход системы заявка теряется, если она застаёт накопитель заполненным полностью;
- системы с накопителем неограниченной емкости (СМО без потерь) (рис. 2.1, а, в, г, д), в которых любая поступившая заявка всегда помещается в накопитель для ожидания обслуживания.

Как отмечалось ранее, предположение о неограниченной емкости накопителя может использоваться для моделирования реальных систем, в которых вероятность потери заявки из-за переполнения накопителя ограниченной емкости меньше Ю-3.

2. По количеству обслуживающих приборов СМО делятся:

- на одноканальные (см. рис. 2.1, а, б, в), содержащие один канал К;
- многоканальные (см. рис. 2.1, г, д), содержащие  $p$  обслуживающих приборов  $K_1, K_2, \dots, K_p, p > 1$ .

В многоканальных СМО обычно предполагается, что все каналы идентичны и равнодоступны для любой заявки, т.е. при нескольких свободных каналах поступившая заявка с равной вероятностью может попасть в любой из них на обслуживание. При ИМ некоторых реальных систем неразличимость каналов вызывает определенные трудности, например при ИМ автоматической телефонной станции, которая обслуживает большое количество абонентов. Каждый из этих абонентов должен быть идентифицирован (иметь номер). При условии идентичности идентификация в многоканальных СМО отсутствует.

3. По количеству классов (типов) заявок, поступающих в СМО, различают системы:

- с однородным потоком заявок (см. рис. 2.1, а, б, г);
- неоднородным потоком заявок (см. рис. 2.1, в, д).

Однородный поток заявок образуют заявки одного класса, а неоднородный поток — это поток заявок нескольких классов.

Ранее мы отметили, по каким признакам производится разделение множества поступающих в СМО заявок на классы: по длительности обслуживания и приоритетам. Если эти признаки идентичны, то заявки относятся к одному классу.

В зависимости от структуры и свойств исследуемых систем их моделями могут служить СМО различных классов. Одна из возможных классификаций моделей приведена на рис. 2.2.

4. В зависимости от характера процессов поступления и обслуживания заявок СМО делятся:

- на стохастические, в которых хотя бы один из интервалов поступления или длительности обслуживания заявок одного класса или разных классов или все они носят случайный характер;
- детерминированные, в которых интервалы всех поступающих заявок и длительности их обслуживания являются детерминированными величинами.

5. До сих пор мы рассматривали СМО, в которых заявки поступали из внешних независимых источников и интенсивность потока заявок не зависела от состояния системы и от числа заявок, уже находящихся в системе. Входящий поток заявок не был связан с выходящим потоком обслуженных заявок. Такие СМО называются разомкнутыми. Варианты разомкнутых СМО приведены выше на рис. 2.1.



Рис. 2.2. Вариант классификации моделей систем массового обслуживания

Существуют также СМО, в которых обслуженные заявки после задержки опять поступают на вход. Интенсивность потока поступающих заявок зависит от состояния самой системы. Такие СМО называются замкнутыми. В замкнутой СМО циркулирует одно и то же конечное число потенциальных заявок. Пока потенциальная заявка не реализовалась в качестве заявки на обслуживание, считается, что она находится в блоке задержки. В момент реализации она поступает в саму систему. В замкнутых СМО источники заявок наряду с каналами обслуживания рассматриваются как элементы СМО.

Программа «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов», предназначена для имитационного моделирования и определения

эффективности многоканальной системы массового обслуживания с конечной очередью в зависимости от интенсивности потока заявок и общего времени работы системы.

В программе учитываются: число обслуживающих каналов, максимальная длина очереди, интенсивность потока заявок, закон распределения времени обслуживания и время работы системы массового обслуживания.

Программа может применяться на различных предприятиях с целью повышения эффективности работы.

Программа «Имитационная модель системы массового обслуживания с переменным числом каналов» обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет вероятности отказа в обслуживании и простоя системы;
- расчет максимальной длины очереди заявок, создаваемой при работе данной системы;
- расчет среднего времени ожидания и пребывания заявки в очереди;
- коэффициент загрузки системы.

## **2.9. Прикладные задачи системного моделирования, работа с программой для ЭВМ №2016617578 «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов», Правообладатель Санкт-Петербургской горный университет (практическая работа)**

Методические аспекты моделирования. Прежде чем рассматривать математические, алгоритмические, программные и прикладные аспекты машинного моделирования, необходимо изучить общие методологические аспекты для широкого класса математических моделей объектов, реализуемых на средствах вычислительной техники. Моделирование с использованием средств вычислительной техники позволяет исследовать механизм явлений, протекающих в реальном объекте с большими или малыми скоростями, когда в натуральных экспериментах с объектом трудно (или невозможно) проследить за изменениями, происходящими в течение короткого времени, или когда получение достоверных результатов сопряжено с длительным экспериментом. При необходимости машинная модель дает возможность как бы «растягивать» или «сжимать» реальное время, так как машинное моделирование связано с понятием системного времени, отличного от реального. Кроме того, с помощью машинного моделирования в диалоговой системе можно обучать персонал, работающий с системой, принятию решений в управлении объектом, например при организации деловой игры, что позволяет выработать необходимые практические навыки реализации процесса управления.

Сущность машинного моделирования системы состоит в проведении на вычислительной машине эксперимента с моделью, которая представляет собой некоторый программный комплекс, описывающий формально и (или) алгоритмически поведение элементов системы  $S$  в процессе ее функционирования, т. е. в их взаимодействии друг с другом и внешней средой  $E$ . Машинное моделирование с успехом применяют в тех случаях, когда трудно четко сформулировать критерий оценки качества функционирования системы и цель ее не поддается полной формализации, поскольку позволяет сочетать программно-технические возможности ЭВМ со способностями человека мыслить неформальными категориями. В дальнейшем основное внимание будет уделено моделированию систем на универсальных ЭВМ как наиболее эффективному инструменту исследования и разработки систем различных уровней.

Требования пользователя к модели. Сформулируем основные требования, предъявляемые к модели  $M$  процесса функционирования системы  $S$ .

1. Полнота модели должна предоставлять пользователю возможность получения необходимого набора оценок характеристик системы с требуемой точностью и достоверностью.

2. Гибкость модели должна давать возможность воспроизведения различных ситуаций при варьировании структуры, алгоритмов и параметров системы.

3. Длительность разработки и реализации модели большой системы должна быть по возможности минимальной при учете ограничений на имеющиеся ресурсы.

4. Структура модели должна быть блочной, т. е. допускать возможность замены, добавления и исключения некоторых частей без переделки всей модели.

5. Информационное обеспечение должно предоставлять возможность эффективной работы модели с базой данных систем определенного класса.

6. Программные и технические средства должны обеспечивать эффективную (по быстродействию и памяти) машинную реализацию модели и удобное общение с ней пользователя.

7. Должно быть реализовано проведение целенаправленных (планируемых) машинных экспериментов с моделью системы с использованием аналитико-имитационного подхода при наличии ограниченных вычислительных ресурсов.

С учетом этих требований рассмотрим основные положения, которые справедливы при моделировании на ЭВМ систем  $S$ , а также их подсистем и элементов. При машинном моделировании системы  $S$  характеристики процесса ее функционирования определяются на основе модели  $M$ , построенной исходя из имеющейся исходной информации об объекте моделирования. При получении новой информации об объекте его модель пересматривается и уточняется с учетом новой информации, т. е. процесс моделирования, включая разработку и машинную реализацию модели, является итерационным. Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет получена модель  $M$ , которую можно считать адекватной в рамках решения поставленной задачи исследования и проектирования системы  $S$ .

Моделирование систем с помощью ЭВМ можно использовать в следующих случаях:

а) для исследования системы  $S$  до того, как она спроектирована, с целью определения чувствительности характеристик к изменениям структуры, алгоритмов и параметров объекта моделирования и внешней среды;

б) на этапе проектирования системы  $S$  для анализа и синтеза различных вариантов системы и выбора среди конкурирующих такого варианта, который удовлетворял бы заданному критерию оценки эффективности системы при принятых ограничениях;

в) после завершения проектирования и внедрения системы, т. е. при ее эксплуатации, для получения информации, дополняющей результаты натуральных испытаний (эксплуатации) реальной системы, и для получения прогнозов эволюции (развития) системы во времени.

Существуют общие положения, применяемые ко всем перечисленным случаям машинного моделирования. Даже в тех случаях, когда конкретные способы моделирования отличаются друг от друга и имеются различные модификации моделей, например в области машинной реализации моделирующих алгоритмов с использованием конкретных программно-технических средств, в практике моделирования систем можно сформулировать общие принципы, которые могут быть положены в основу методологии машинного моделирования.

Этапы моделирования систем. Рассмотрим основные этапы моделирования системы  $S$ , к числу которых относятся: построение концептуальной модели системы и ее формализация; алгоритмизация модели системы и ее машинная реализация; получение и интерпретация результатов моделирования системы.

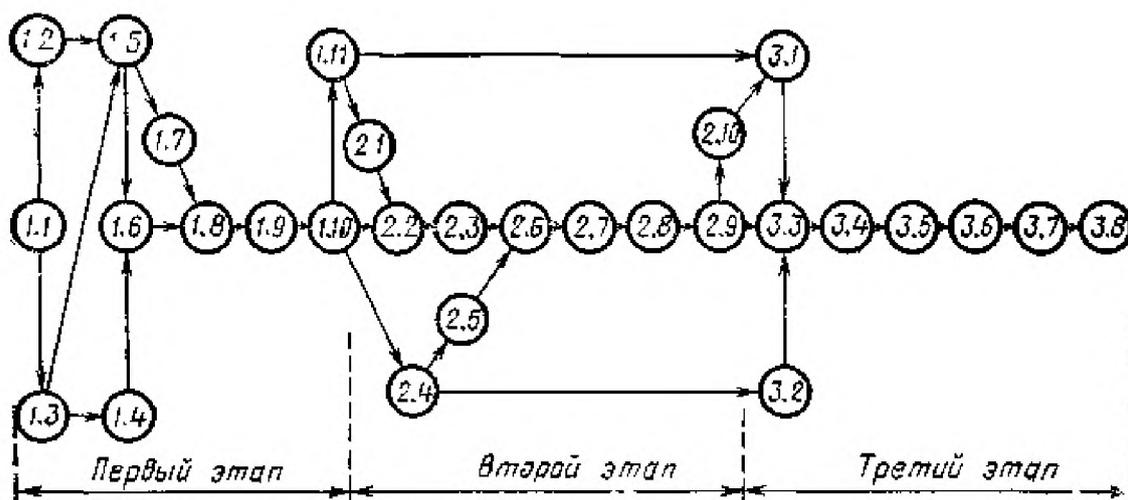


Рис. 1. Взаимосвязь этапов моделирования систем

Взаимосвязь перечисленных этапов моделирования систем и их составляющих (подэтапов) может быть представлена в виде сетевого графика, показанного на рис. 1. Перечислим эти подэтапы: 1.1 - постановка задачи машинного моделирования системы; 1.2 - анализ задачи моделирования системы; 1.3 - определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора; 1.4 - выдвижение гипотез и принятие предположений; 1.5 - определение параметров и переменных модели; 1.6 - установление основного содержания модели; 1.7 - обоснование критериев оценки эффективности системы; 1.8 - определение процедур аппроксимации; 1.9 - описание концептуальной модели системы; 1.10 - проверка достоверности концептуальной модели; 1.11 - составление технической документации по первому этапу; 2.1 - построение логической схемы модели; 2.2 - получение математических соотношений; 2.3 - проверка достоверности модели системы; 2.4 - выбор вычислительных средств для моделирования; 2.5 - составление плана выполнения работ по программированию; 2.6 - построение схемы программы; 2.7 - проверка достоверности схемы программы; 2.8 - проведение программирования модели; 2.9 - проверка достоверности программы; 2.10 - составление технической документации по второму этапу; 3.1 - планирование машинного эксперимента с моделью системы; 3.2 - определение требований к вычислительным средствам; 3.3 - проведение рабочих расчетов; 3.4 - анализ результатов моделирования системы; 3.5 - представление результатов моделирования; 3.6 - интерпретация результатов моделирования; 3.7 - подведение итогов моделирования и выдача рекомендаций; 3.8 - составление технической документации по третьему этапу.

Таким образом, процесс моделирования системы  $S$  сводится к выполнению перечисленных подэтапов, сгруппированных в виде трех этапов. На этапе построения концептуальной модели  $M_k$  и ее формализации проводится исследование моделируемого объекта с точки зрения выделения основных составляющих процесса его функционирования, определяются необходимые аппроксимации и получается обобщенная схема модели системы  $S$ , которая преобразуется в машинную модель  $M_m$  на втором этапе моделирования путем последовательной алгоритмизации и программирования модели. Последний третий этап моделирования системы сводится к проведению согласно полученному плану рабочих расчетов на ЭВМ с использованием выбранных программно-технических средств, получению и интерпретации результатов моделирования системы  $S$  с учетом воздействия внешней среды  $E$ . Очевидно, что при построении модели и ее машинной реализации при получении новой информации возможен пересмотр ранее принятых решений, т. е. процесс моделирования является итерационным. Рассмотрим содержание каждого из этапов более подробно.

## ПОСТРОЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ И ЕЕ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

На первом этапе машинного моделирования - построения концептуальной модели  $M_k$  системы  $S$  и ее формализации - формулируется модель и строится ее формальная схема, т. е. основным назначением этого этапа является переход от содержательного описания объекта к его математической модели, другими словами, процессу формализации. Моделирование систем на ЭВМ в настоящее время - наиболее универсальный и эффективный метод оценки характеристик больших систем. Наиболее ответственными и наименее формализованными моментами в этой работе являются проведение границы между системой  $S$  и внешней средой  $E$ , упрощение описания системы и построение сначала концептуальной, а затем формальной модели системы. Модель должна быть адекватной, иначе невозможно получить положительные результаты моделирования, т. е. исследование процесса функционирования системы на неадекватной модели вообще теряет смысл. Под адекватной моделью будем понимать модель, которая с определенной степенью приближения на уровне понимания моделируемой системы  $S$  разработчиком модели отражает процесс ее функционирования во внешней среде  $E$ .

Переход от описания к блочной модели. Наиболее рационально строить модель функционирования системы по блочному принципу. При этом могут быть выделены три автономные группы блоков такой модели. Блоки первой группы представляют собой имитатор воздействий внешней среды  $E$  на систему  $S$ ; блоки второй группы являются собственно моделью процесса функционирования исследуемой системы  $S$ ; блоки третьей группы - вспомогательными и служат для машинной реализации блоков двух первых групп, а также для фиксации и обработки результатов моделирования.

Рассмотрим механизм перехода от описания процесса функционирования некоторой гипотетической системы к модели этого процесса. Для наглядности введем представление об описании свойств процесса функционирования системы  $S$ , т. е. об ее концептуальной модели  $M_k$  как совокупности некоторых элементов, условно изображенных квадратами так, как показано на рис. 2, а. Эти квадраты представляют собой описание некоторых подпроцессов исследуемого процесса функционирования системы  $S$ , воздействия внешней среды  $E$  и т. д. Переход от описания системы к ее модели в этой интерпретации сводится к исключению из рассмотрения некоторых второстепенных элементов описания (элементы 5-8, 39-41, 43-47). Предполагается, что они не оказывают существенного влияния на ход процессов, исследуемых с помощью модели. Часть элементов (14, 15, 28, 29, 42) заменяется пассивными связями  $h_1$ , отражающими внутренние свойства системы (рис. 2, б). Некоторая часть элементов 1-4, 10, 11, 24, 25 заменяется входными факторами  $x$  и воздействиями внешней среды  $\nu_1$ . Возможны и комбинированные замены: элементы 9, 18, 19, 32, 33 заменены пассивной связью  $h_2$  и воздействием внешней среды  $\nu_2$ . Элементы 22, 23, 36, 37 отражают воздействие системы на внешнюю среду  $y$ .

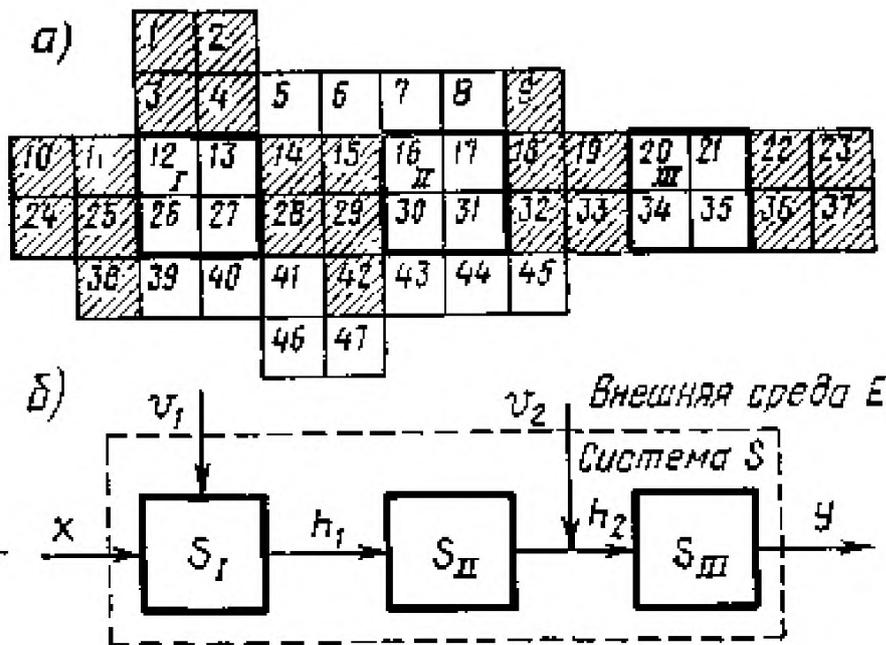


Рис. 2. Модель системы: а - концептуальная; б - блочная

Оставшиеся элементы системы  $S$  группируются в блоки  $S_I, S_{II}, S_{III}$ , отражающие процесс функционирования исследуемой системы. Каждый из этих блоков достаточно автономен, что выражается в минимальном количестве связей между ними: Поведение этих блоков должно быть хорошо изучено и для каждого из них построена математическая модель, которая в свою очередь может содержать ряд подблоков. Построенная блочная модель процесса функционирования исследуемой системы  $S$  предназначена для анализа характеристики этого процесса, который может быть проведен при машинной реализации полученной модели.

Математические модели процессов. После перехода от описания моделируемой системы  $S$  к ее модели  $M_k$ , построенной по блочному принципу, необходимо построить математические модели процессов, происходящих в различных блоках. Математическая модель представляет собой совокупность соотношений (например, уравнений, логических условий, операторов), определяющих характеристики процесса функционирования системы  $S$  в зависимости от структуры системы, алгоритмов поведения, параметров системы, воздействий внешней среды  $E$ , начальных условий и времени. Математическая модель является результатом формализации процесса функционирования исследуемой системы, т.е. построения формального (математического) описания процесса с необходимой в рамках проводимого исследования степенью приближения к действительности.

Для иллюстрации возможностей формализации рассмотрим процесс функционирования некоторой гипотетической системы  $S$ , которую можно разбить на  $t$  подсистем с характеристиками  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_{nY}(t)$ , с параметрами  $h_1(t), h_2(t), \dots, h_{nH}(t)$ , при наличии входных воздействий  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_{nX}(t)$  и воздействий внешней среды  $v_1(t), v_2(t), \dots, v_{nV}(t)$ . Тогда математической моделью процесса может служить система соотношений вида

$$\begin{aligned}
 y_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; u_1, u_2, \dots, u_{nV}; h_1, h_2, \dots, h_{nH}; t); & \square \\
 y_2(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; u_1, u_2, \dots, u_{nV}; h_1, h_2, \dots, h_{nH}; t); & \square \\
 &\dots & \square \\
 y_{nY}(t) &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; u_1, u_2, \dots, u_{nV}; h_1, h_2, \dots, h_{nH}; t). & \square
 \end{aligned} \tag{1}$$

Если бы функции  $f_1, f_2, \dots, f_m$  были известны, то соотношения (1) оказались бы идеальной математической моделью процесса функционирования системы S. Однако на практике получение модели достаточно простого вида для больших систем чаще всего невозможно, поэтому обычно процесс функционирования системы S разбивают на ряд элементарных подпроцессов. При этом необходимо так проводить разбиение на подпроцессы, чтобы построение моделей отдельных подпроцессов было элементарно и не вызывало трудностей при формализации. Таким образом, на этой стадии сущность формализации подпроцессов будет состоять в подборе типовых математических схем. Например, для стохастических процессов это могут быть схемы вероятностных автоматов (P-схемы), схемы массового обслуживания (Q-схемы) и т.д., которые достаточно точно описывают основные особенности реальных явлений, составляющих подпроцессы, с точки зрения решаемых прикладных задач.

Таким образом, формализации процесса функционирования любой системы S должно предшествовать изучение составляющих его явлений. В результате появляется содержательное описание процесса, которое представляет собой первую попытку четко изложить закономерности, характерные для исследуемого процесса, и постановку прикладной задачи. Содержательное описание является исходным материалом для последующих этапов формализации: построения формализованной схемы процесса функционирования системы и математической модели этого процесса. Для моделирования процесса функционирования системы на ЭВМ необходимо преобразовать математическую модель процесса в соответствующий моделирующий алгоритм и машинную программу.

Подэтапы первого этапа моделирования. Рассмотрим более подробно основные подэтапы построения концептуальной модели  $M_k$  системы и ее формализации (см. рис. 1).

1.1. Постановка задачи машинного моделирования системы. Дается четкая формулировка задачи исследования конкретной системы S и основное внимание уделяется таким вопросам, как: а) признание существования задачи и необходимости машинного моделирования; б) выбор методики решения задачи с учетом имеющихся ресурсов; в) определение масштаба задачи и возможности разбиения ее на подзадачи.

Необходимо также ответить на вопрос о приоритетности решения различных подзадач, оценить эффективность возможных математических методов и программно-технических средств их решения. Тщательная проработка этих вопросов позволяет сформулировать задачу исследования и приступить к ее реализации. При этом возможен пересмотр начальной постановки задачи в процессе моделирования.

1.2. Анализ задачи моделирования системы. Проведение анализа задачи способствует преодолению возникающих в дальнейшем трудностей при ее решении методом моделирования. На рассматриваемом втором этапе основная работа сводится именно к проведению анализа, включая: а) выбор критериев оценки эффективности процесса функционирования системы S; б) определение эндогенных и экзогенных переменных модели M; в) выбор возможных методов идентификации; г) выполнение предварительного анализа содержания второго этапа алгоритмизации модели системы и ее машинной реализации; д) выполнение предварительного анализа содержания третьего этапа получения и интерпретации результатов моделирования системы.

1.3. Определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора. После постановки задачи моделирования системы  $S$  определяются требования к информации, из которой получают качественные и количественные исходные данные, необходимые для решения этой задачи. Эти данные помогают глубоко разобраться в сущности задачи, методах ее решения. Таким образом, на этом подэтапе проводится: а) выбор необходимой информации о системе  $S$  и внешней среде  $E$ ; б) подготовка априорных данных; в) анализ имеющихся экспериментальных данных; г) выбор методов и средств предварительной обработки информации о системе.

При этом необходимо помнить, что именно от качества исходной информации об объекте моделирования существенно зависят как адекватность модели, так и достоверность результатов моделирования.

1.4. Выдвижение гипотез и принятие предположений. Гипотезы при построении модели системы  $S$  служат для заполнения «пробелов» в понимании задачи исследователем. Выдвигаются также гипотезы относительно возможных результатов моделирования системы  $S$ , справедливость которых проверяется при проведении машинного эксперимента. Предположения предусматривают, что некоторые данные неизвестны или их нельзя получить. Предположения могут выдвигаться относительно известных данных, которые не отвечают требованиям решения поставленной задачи. Предположения дают возможность провести упрощения модели в соответствии с выбранным уровнем моделирования. При выдвижении гипотез и принятии предположений учитываются следующие факторы: а) объем имеющейся информации для решения задач; б) подзадачи, для которых информация недостаточна; в) ограничения на ресурсы времени для решения задачи; г) ожидаемые результаты моделирования.

Таким образом, в процессе работы с моделью системы  $S$  возможно многократное возвращение к этому подэтапу в зависимости от полученных результатов моделирования и новой информации об объекте.

1.5. Определение параметров и переменных модели. Прежде чем перейти к описанию математической модели, необходимо определить параметры системы  $h_k, k = \overline{1, n_H}$ , входные и выходные переменные  $x_i, i = \overline{1, n_X}$ ,  $y_j, j = \overline{1, n_Y}$ , воздействия внешней среды  $v_l, l = \overline{1, n_V}$ . Конечной целью этого подэтапа является подготовка к построению математической модели системы  $S$ , функционирующей во внешней среде  $E$ , для чего необходимо рассмотрение всех параметров и переменных модели и оценка степени их влияния на процесс функционирования системы в целом. Описание каждого параметра и переменной должно даваться в следующей форме: а) определение и краткая характеристика; б) символ обозначения и единица измерения; в) диапазон изменения; г) место применения в модели.

1.6. Установление основного содержания модели. На этом подэтапе определяется основное содержание модели и выбирается метод построения модели системы, которые разрабатываются на основе принятых гипотез и предположений. При этом учитываются следующие особенности: а) формулировка задачи моделирования системы; б) структура системы  $S$  и алгоритмы ее поведения, воздействия внешней среды  $E$ ; в) возможные методы и средства решения задачи моделирования.

1.7. Обоснование критериев оценки эффективности системы. Для оценки качества процесса функционирования моделируемой системы  $S$  необходимо выбрать некоторую совокупность критериев оценки эффективности, т. е. в математической постановке задача сводится к получению соотношения для оценки эффективности как функции параметров и переменных системы. Эта функция представляет собой поверхность отклика в исследуемой области изменения параметров и переменных и позволяет определить реакцию системы. Эффективность системы  $S$  можно оценить с помощью интегральных или частных критериев, выбор которых зависит от рассматриваемой задачи.

1.8. Определение процедур аппроксимации. Для аппроксимации реальных процессов, протекающих в системе  $S$ , обычно используются три вида процедур: а) детерминированную; б) вероятностную; в) определения средних значений.

При детерминированной процедуре результаты моделирования однозначно определяются по данной совокупности входных воздействий, параметров и переменных системы  $S$ . В этом случае отсутствуют случайные элементы, влияющие на результаты моделирования. Вероятностная (рандомизированная) процедура применяется в том случае, когда случайные элементы, включая воздействия внешней среды  $E$ , влияют на характеристики процесса функционирования системы  $S$  и когда необходимо получить информацию о законах распределения выходных переменных. Процедура определения средних значений используется тогда, когда при моделировании системы интерес представляют средние значения выходных переменных при наличии случайных элементов.

1.9. Описание концептуальной модели системы. На этом подэтапе построения модели системы: а) описывается концептуальная модель  $M_k$  в абстрактных терминах и понятиях; б) дается описание модели с использованием типовых математических схем; в) принимаются окончательно гипотезы и предположения; г) обосновывается выбор процедуры аппроксимации реальных процессов при построении модели. Таким образом, на этом подэтапе проводится подробный анализ задачи, рассматриваются возможные методы ее решения и дается детальное описание концептуальной модели  $M_k$ , которая затем используется на втором этапе моделирования.

1.10. Проверка достоверности концептуальной модели. После того как концептуальная модель  $M_k$  описана, необходимо проверить достоверность некоторых концепций модели перед тем, как перейти к следующему этапу моделирования системы  $S$ . Проверять достоверность концептуальной модели достаточно сложно, так как процесс ее построения является эвристическим и такая модель описывается в абстрактных терминах и понятиях. Один из методов проверки модели  $M_k$  - применение операций обратного перехода, позволяющий проанализировать модель, вернуться к принятым аппроксимациям и, наконец, рассмотреть снова реальные процессы, протекающие в моделируемой системе  $S$ . Проверка достоверности концептуальной модели  $M_k$  должна включать: а) проверку замысла модели; б) оценку достоверности исходной информации; в) рассмотрение постановки задачи моделирования; г) анализ принятых аппроксимаций; д) исследование гипотез и предположений.

Только после тщательной проверки концептуальной модели  $M_k$  следует переходить к этапу машинной реализации модели, так как ошибки в модели  $M_k$  не позволяют получить достоверные результаты моделирования.

Теоретическая часть.

Правил построения математических моделей механических устройств:

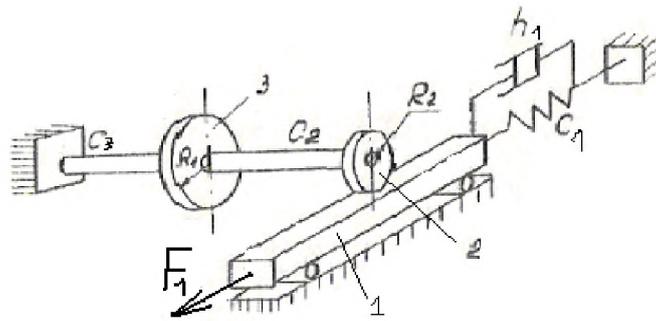
1. Систему разделяют так, чтобы каждая подсистема содержала одну сосредоточенную массу. Количество подсистем должно быть равно числу сосредоточенных масс механического устройства.

2. Движущие силы, действующие на подсистему, следует отмечать кружками и представлять эти силы на электрической схеме в виде источников Э.Д.С.

3. Силы сопротивления, действующие на подсистему, следует обозначать на электрической в виде напряжений между соответствующими узлами.

4. Для обозначения электрических элементов использовать символы, которыми обозначены аналогичные элементы механического устройства.

Практическая часть:



Дано:

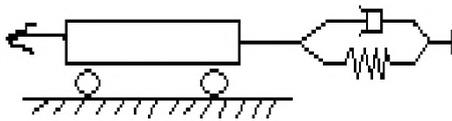
$$m_1=20\text{кг}, m_2=8\text{кг}, m_3=35\text{кг}$$

$$R_3=0.9\text{м}, R_2=0,1 \cdot R_3=0.09\text{м}$$

$$C_3=c_2=105 \text{ Н*м}, c_1=25 \text{ Н*м}$$

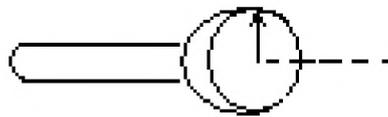
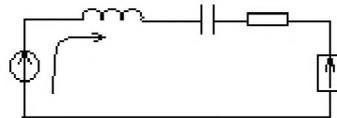
$$F_1=15 \text{ Н}$$

Разбиваем систему на 3 подсистемы из 3-х масс.



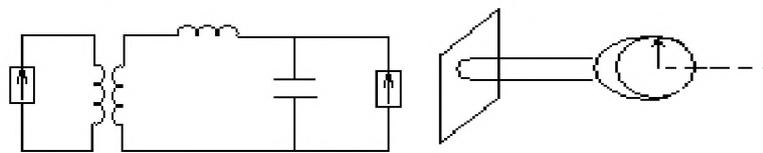
$$F_1 - R_a - F_{c1} - F_h - F_{и1} = 0$$

Электрическая схема



$$M_2 - M_{и2} - M_{с3} = 0$$

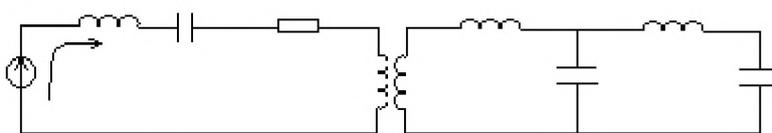
Электрическая схема



Электрическая схема



Эквивалентная схема



Уравнения трансформаторов:

$$M \ddot{2} = F \ddot{2} * R2$$

$$\omega \ddot{2} * R2 = V \ddot{2}$$

$$\dot{\omega} \ddot{2} * R2 = \dot{V} \ddot{2}$$

Граф связей:

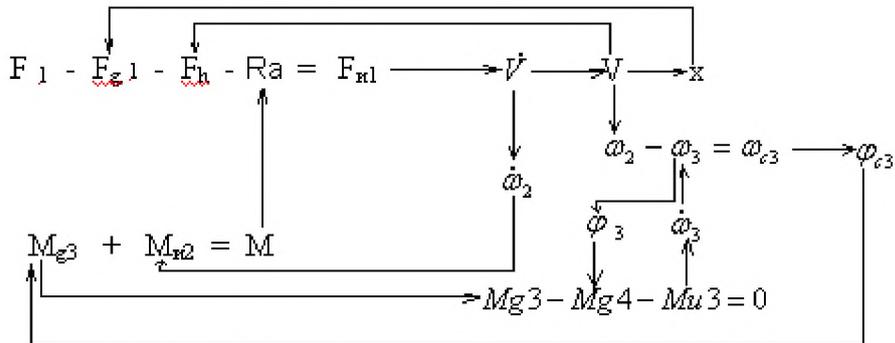
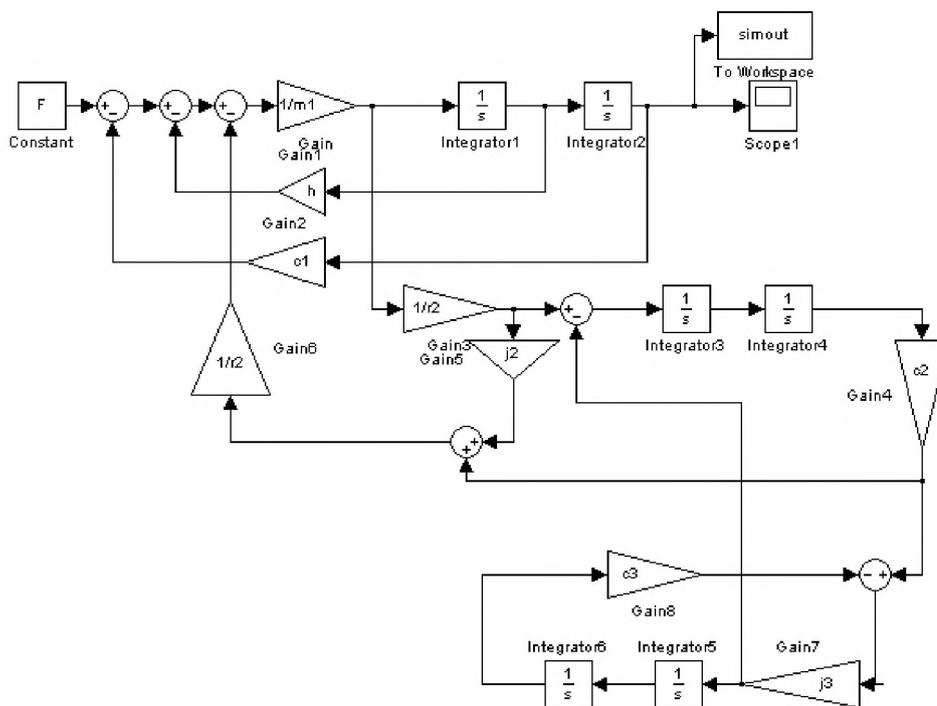


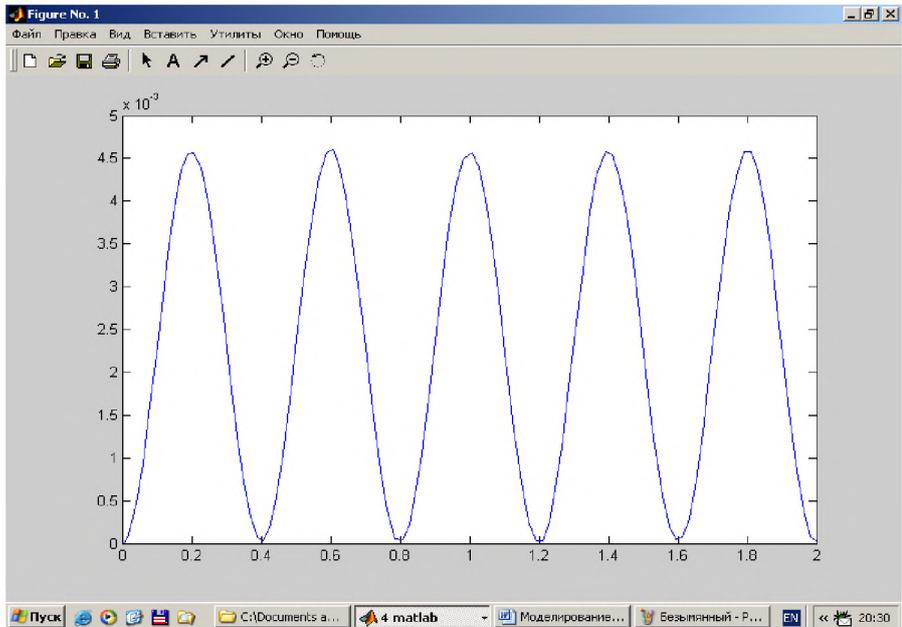
Схема в MathLab:



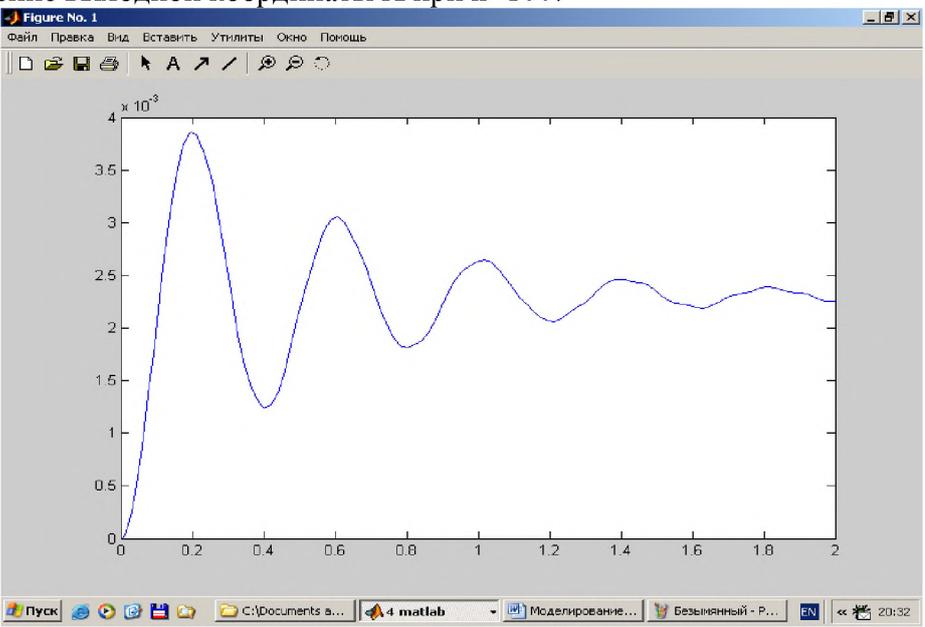
В окне команд MathLab вводим данные:

```
>> m1=20;
>> m2=8;
>> m3=35;
>> r3=0.9;
>> r2=0.09;
>> c1=25;
>> c2=105;
>> c3=105;
>> F=15;
>> j2=(m2*r2^2)/2;
>> j3=(m3*r3^2)/2;
>> h=0;
```

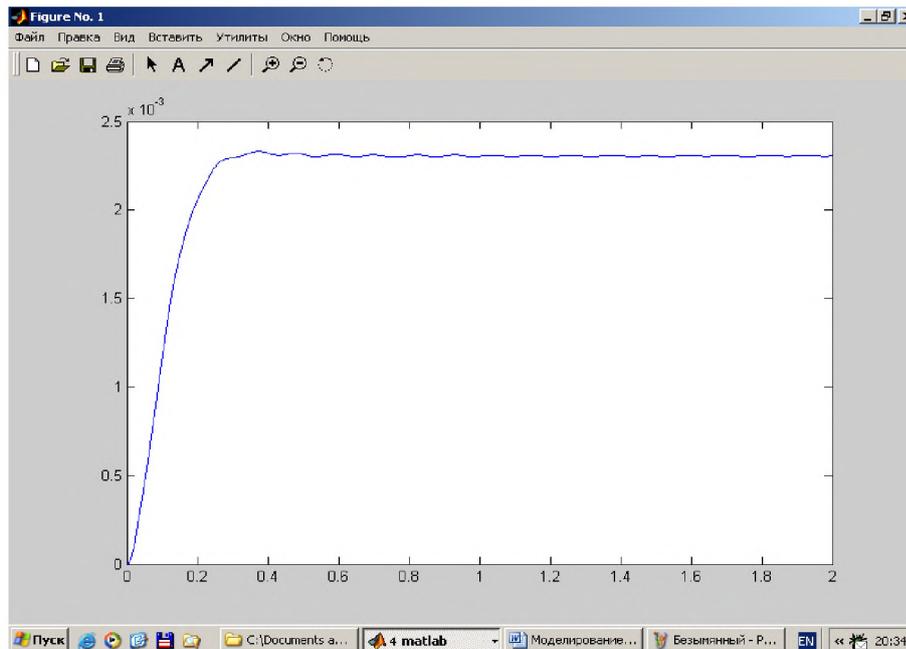
Значение выходной координаты X при h=0:



Значение выходной координаты X при h=100:



Значение X при h=700:



Программа «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов», предназначена для моделирования и анализа показателей эффективности многоканальной системы массового обслуживания с конечной очередью в зависимости от интенсивности потока заявок, общего времени работы системы и закона распределения времени обслуживания.

В программе учитываются: число обслуживающих каналов, интенсивность потока заявок, максимальная длина очереди, закон распределения времени обслуживания и время работы системы массового обслуживания.

Программа может применяться на различных предприятиях с целью повышения эффективности работы.

Программа «Имитационная модель многоканальной системы массового обслуживания с варьируемым числом каналов» обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчёт абсолютной пропускной способности системы;
- расчёт относительной пропускной способности;
- расчёт вероятности отказа в обслуживании и простоя системы;
- расчёт среднего числа занятых сотрудников;
- расчёт среднего числа заявок в очереди;

## **МОДУЛЬ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

### **3.1. Основные понятия и принципы разработки математической модели технологического процесса**

(лекция)

На данный момент при проведении гидрогеологических исследований чаще всего используются два вида моделей: гидродинамические и гидравлические. Применение модели определенного вида варьируется относительно поставленной задачи. Преимущество гидродинамической модели заключается в возможности наиболее точно отразить особенности гидрогеологического строения месторождения. Но для точного отражения структуры объекта и максимального соответствия результатов моделирования реальным данным требуется серьезное информационное обеспечение. При разработке модели данного вида учитывается соотношение необходимой точности моделирования и времени расчета. Так как помимо водного воздействия на реальный природный объект действует большой набор внешних факторов (уровень выпадения осадков, неоднородность залегания пород, которая вносит параметрическое возмущение в систему и другие), их учет способен значительно увеличить время вычислительного процесса.

Второй рассматриваемый тип моделей – это гидравлические модели. Данный тип моделей используется, когда по каким-либо причинам невозможно или экономически невыгодно получение достаточного объема информации для разработки математической модели. Для разработки данного вида моделей требуется минимальный объем данных, получаемых в результате фактического наблюдения реакции объекта на заданное входное воздействие. Используя совокупность методов гидравлики и гидродинамики, в результате гидравлического моделирования возможна экстраполяция полученных данных о реакции объекта на перспективу.

Современная база знаний по моделированию гидрогеологических объектов позволяет вывести основные общие принципы и требования к разрабатываемым моделям. В качестве вывода можно представить два базовых подхода к разработке модели:

1. Математическая модель, учитывающая влияние максимального количества внешних и внутренних факторов на моделируемый объект. Данный подход повышает точность моделирования, но усложняет вычислительную схему, что делает его процесс расчета более трудоемким.

2. Математическая модель, учитывающая основные факторы, влияющие на объект моделирования. Посредством анализа можно установить нижнюю границу значения коэффициента влияния конкретного фактора на реакцию объекта, что позволит выделить набор факторов, влиянием которых можно пренебречь без значительной потери точности моделирования. Данный подход применим в условиях, когда установлена необходимая минимальная точность моделирования, а учет всех факторов нецелесообразен.

После разработки математической модели необходимо выполнить проверку адекватности модели. При проверке разработанной или проектируемой модели используется заранее выбранное ограниченное подмножество состояний. В связи с этим необходимо решение проблемы устойчивости системы. В общей постановке задачи система может быть замкнутой или разомкнутой. В данном конкретном случае предполагается использование системы с замкнутым циклом, который будет реализован по принципу обратной связи, подразумевающему зависимость устойчивости системы от физических параметров моделируемых процессов. Методы теории автоматического управления (ТАУ) позволяют определить параметры модели таким образом, чтобы система сохраняла устойчивость.

В том случае, когда результаты проверки адекватности модели показали, что модель не удовлетворяет предъявленным требованиям, необходимо провести

верификацию модели. Процесс верификации модели можно условно разделить на три этапа:

- полное изменение (кардинальное изменение или разработка новых алгоритмов, функций, свойств);
- частное изменение (коррекция разработанных алгоритмов, функций и свойств);
- определение верификационных параметров.

Совокупность вышеописанных подходов к моделированию гидродинамических процессов представляет собой геофильтрационное моделирование. В настоящее время геофильтрационное моделирование широко используется в гидрогеологических и научных исследованиях, вытеснив ввиду своей гибкости аналоговое моделирование. Несмотря на популярность геофильтрационного моделирования, данная методика находится в начальной стадии исследований, чем обусловлены проблемы полного практического внедрения данного метода:

- недостаточность исследований по оценке точности применяемых вычислительных схем. Проблема заключается в отсутствии оценки точности общих решений задач с типовыми гидродинамическими параметрами, что делает невозможным проведение сравнения методов для выявления для определения наиболее эффективных границ их применения.

- отсутствие типовой структуры и требований к минимальному функционалу, что усложняет интеграцию разработанных систем для решения другого класса задач.

Представленные обстоятельства и сложность проведения опытно-фильтрационных работ, позволяющих собрать исходные данные для моделирования, значительно усложняют внедрение численного моделирования в практику гидрогеологов. Однако в фундаментальных трудах по гидродинамическому моделированию отмечено, что участие специалистов-практиков по гидрогеологии необходимо для разработки эффективной модели, адекватно отражающей гидродинамические процессы реального природного объекта.

В данной работе предлагается рассмотреть метод моделирования месторождений минеральных вод с использованием системы уравнений геофильтрации и массопереноса.

Было принято решение не рассматривать уравнение массопереноса, так как для достижения цели, поставленной в работе, нет необходимости рассматривать массоперенос вещества и прогнозировать изменения в химическом составе минеральной воды. Поэтому предлагается более подробно рассмотреть уравнение геофильтрации и спектр его применения.

Геофильтрационная модель представляет собой уравнение или систему уравнений в частных производных, реализующих плоскопространственное или трехмерное представление объекта моделирования и дополненных граничными условиями. В качестве исходных данных для моделирования выступают следующие параметры объекта: количество пластов, их протяженность, мощность и емкостные характеристики, количество добывающих и эксплуатационных скважин. В качестве параметрического обеспечения модели выступают данные опытно-фильтрационных работ (коэффициенты фильтрации, упругоёмкости, перетекания). Сложность параметрического обеспечения модели заключается в определении данных параметров, так как результаты точечных оценок имеют погрешность относительно реальных значений. Так как было предложено рассматривать объект моделирования как распределенный объект, то необходимо получить обоснование пространственного распределения параметров, учитываемых в модели. Соответственно, для проверки точности результатов моделирования необходимо обладать методикой верификации. Применительно к гидрогеологическим объектам методика верификации заключается в сравнении результатов моделирования с ретроспективными данными. На объект моделирования подается входное воздействие, соответствующее по величине воздействию, поданному на месторождение в процессе

эксплуатации. В результате проводится сравнение значений установившегося уровня напора реального объекта и моделируемого. Если погрешность моделирования составляет менее 20%, то результаты моделирования считаются достоверными и могут быть использованы для дальнейших исследований. В том случае, когда погрешность составляет более 20%, проводится корректировка параметров, позволяющая повысить сходимость фактических и модельных данных.

Для разработки модельного пласта были использованы данные с сегмента месторождения минеральных вод. Схематичное представление модельного пласта представлено на рисунке 1.1.

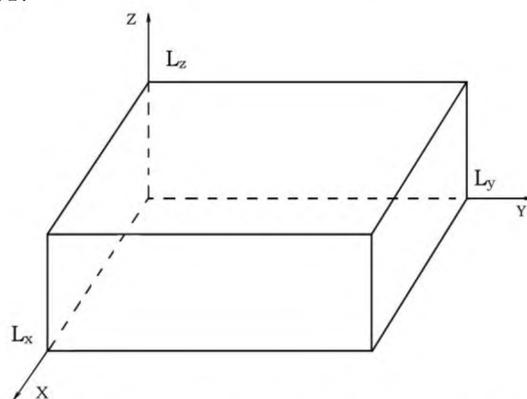


Рисунок 1.1 – Схема модельного пласта месторождения

Наличие конструктивных, геометрических и гидрогеологических данных позволило разработать модель. Граничные условия модели заданы условно водонепроницаемыми пластами, математически это может быть представлено как  $z = 0, z = L_z \nu \rightarrow 0$ . Геометрические размеры моделируемого сегмента обозначены, как  $L_x, L_y, L_z$ , и имеют следующие значения  $L_x = 1000$  м,  $L_y = 1000$  м,  $L_z = 300$  м.

Пласт месторождения и процессы, проходящие в нем, могут быть охарактеризованы большим набором параметров. При разработке модельного пласта нет необходимости в усложнении вычислений и учете большого количества параметров, поэтому в данном случае для моделирования были выбраны и определены следующие гидродинамические параметры:

- коэффициент фильтрации;
- коэффициент упругости.

В уравнении геофильтрации коэффициент фильтрации  $k$  (м/сут) является наиболее важным, так как не только дает представление об интенсивности движения жидкости в пласте, но и позволяет количественно представить её объем. Значение данного коэффициента зависит от пористости породы и гидрохимических составляющих жидкости. Для определения коэффициента проводятся опытно-фильтрационные работы. По точечным замерам определяется среднее значение коэффициента на заданной площади. Математическое описание данного коэффициента было сформулировано А. Дарси и выражается отношением скорости фильтрации к гидравлическому градиенту (уравнение 1.17).

$$\nu = \frac{Q}{F} = k \cdot I \Rightarrow k = \frac{\nu}{I} \quad (1)$$

$\nu$  — скорость фильтрации (м/сут);

$I$  — гидравлический градиент (безразмерная величина);

$Q$  — расход жидкости (м<sup>3</sup>/сут);

$F$  — площадь поперечного сечения (м<sup>2</sup>).

Принимая в уравнении (2)  $F = 1, I = 1$ , расход жидкости является равным коэффициенту фильтрации, что при значении гидравлического градиента, равного 1 позволяет представить коэффициент фильтрации как объем воды, проходящий через площадь поперечного сечения принятой равной 1 за единицу времени.

Коэффициент упругоэластичности  $\eta^*$  может быть представлен изменение объема воды в единице объема рассматриваемой породы при изменении напора равном 1. Значение данного коэффициента варьируется от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  ( $\text{м}^{-1}$ ) в зависимости от типа породы, из которой состоит пласт.

Уравнение геофильтрации для модельного пласта предлагается записать в следующем виде:

$$\eta^* \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - F_x \cdot \frac{\partial S}{\partial x} - \hat{S}(t) \cdot \delta(x, y, z), \quad (3)$$

где  $S(x, y, z, t)$  - понижение уровня воды в пласте вследствие водоотбора (забор воды);

$\hat{S}(t)$  - входное воздействие на объект управления. С использованием дельта-функций появляется возможность задать входное воздействие в желаемых точках дискретизации, что значительно повышает соответствие модельного объекта реальному. В точках приложения входного воздействия  $\delta(x, y, z) = 1$  (значения дельта-функции в других точках  $\delta(x, y, z) = 0$ ).

Далее предлагается определить начальные условия модели. Определение начальных условий заключается в определении исходной функции с момент времени, когда  $t = 0$ . Существуют два базовых способа задачи начальных условий:

1.  $t = 0, Q = 0, S = 0$ .
2.  $t = 0, Q = 0, H = H_{cm}$ .

где  $Q$  - дебит эксплуатационной скважины, м/сут,

$H_{cm}$  - стационарный напор в пласте, м.

В первом случае естественная пьезометрическая поверхность уровня подземных вод рассматривается как нулевая, расчеты ведутся в понижениях, и после завершения вычислений, полученные срезки уровня даются в виде схемы распределения понижений или накладываются на статическую поверхность, в результате чего получается искомая схема распределения динамических уровней. Эта постановка встречается наиболее часто. Она проста, не требует знания начального распределения естественных напоров, объем вычислений здесь минимален. Может быть, для целого ряда задач она вполне приемлема, однако при изучении процессов миграции, массопереноса, задач экологического плана, необходимо иметь решение не в понижениях, а в напорах [13].

При выборе второго способа постановки начальных условий расчет производится относительно напоров в пластах, а не от изменения уровня жидкости в пласте, как в первом случае.

Для модельного пласта начальные условия были сформулированы следующим образом:

$$\begin{aligned}
S(x, y, z, 0) &= 0; \\
0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z; \\
t &= 0.
\end{aligned} \tag{5}$$

После определения начальных условий предлагается перейти к определению граничных условий. Граничные условия описывают изменение движения жидкости в пласте на границах моделируемого сегмента месторождения. В основе постановки граничных условий лежат два основных способа:

1. Представление границ пласта водопроницаемыми. Данный способ используется в случае непосредственного сообщения моделируемой области с источником жидкости. В большинстве случаев, так описываются боковые границы моделируемой области, лежащие по оси распределения потока.

2. Представление границ пласта водонепроницаемыми. Таким способом описываются границы моделируемой области, не имеющие прямого сообщения с источником жидкости. В большинстве случаев это нижняя граница пласта или месторождения, при условии отсутствия перетекания жидкости из нижних пластов, если такие имеются.

Граничные условия определяются посредством анализа целого комплекса данных, получаемых в ходе геолого-гидрогеологических работ и процесса эксплуатации.

Предлагается сформулировать граничные условия для выбранного сегмента месторождения. Производная изменения уровня жидкости в пласте  $S$  на границе объекта принята равной нулю, что является граничным условием II рода и говорит о том, что понижение уровня  $S$  граничной точки равно понижению уровне  $S$  в соседней с границей точке. Границы моделируемой области заданы водонепроницаемыми. Соответственно, для поверхностей  $x = 0, x = L_x, y = 0, y = L_y$  граничные условия могут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S(L_x, y, z, t)}{\partial x} &= 0, S(0, y, z, t) = 0; \\
\frac{\partial S(x, 0, z, t)}{\partial y} &= \frac{\partial S(x, L_y, z, t)}{\partial y} = 0; \\
0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z; \\
t &\geq 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

Важной особенностью Нагутского месторождения является разделение водоносных пластов не одним, а несколькими водоупругими (водонепроницаемыми) пластами, что позволяет задать границы месторождения по координате  $z$  водонепроницаемыми. Таким образом, поверхности  $z = 0, z = L_z$  могут быть описаны граничными условиями I рода и представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
S(x, y, 0, t) &= S(x, y, L_z, t) = 0, \\
0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z; \\
t &\geq 0.
\end{aligned} \tag{7}$$

После разработки математической модели объекта предлагается перейти к определению формы входного воздействия на объект  $S(x)$  (заданное изменение уровня жидкости в пласте в области расположения добывающих скважин).

Входное воздействие  $\bar{S}(x, Y^*, Z^*, t)$ , где  $Y^*, Z^*$  - заданные числа, а  $t$  - момент времени, может быть записано в виде:

$$S(x) = \sum_n^{\infty} A_n \cdot \cos(\psi_n \cdot x), \quad (8)$$

где  $n$  – номер гармоники ряда Фурье;

$A_n$  - весовой коэффициент;

$\psi_n$  – пространственная частота (аналог угловой частоты, представленной как функция координаты, рад/м).

Если представить  $\psi_n$  как  $\psi_n = \pi \cdot n / L_x$  ( $\eta = \overline{1, \infty}$ ), то выражение (1) принимает следующий вид:

$$S(x) = \sum_n^{\infty} A_n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L_x}\right).$$

Любой член ряда может быть отдельно представлен как:

$$S_n(x) = A_n \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L_x}\right).$$

Исходя из этого, I и II гармоники ряда имеют следующий вид:

$$S_1(x) = A_1 \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{L_x}\right). \quad S_2(x) = A_2 \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{L_x}\right).$$

Если на объект, представленный математической моделью (3)-(7) будет подано входное воздействие в форме (8), то на выходе будет получено распределение изменения уровня жидкости в моделируемом пласте. Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы для определения значения параметров передаточной функции объекта, которая является инструментом определения динамики объекта.

На рисунке 1.9 представлено распределение функции выхода  $S_{вых}$  в пространстве.

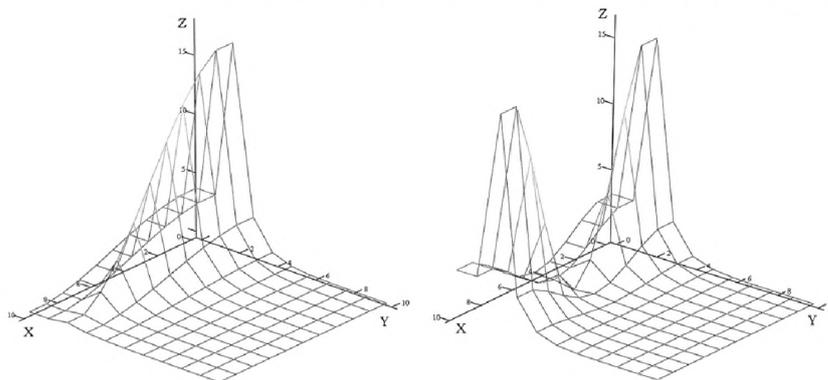


Рисунок 1.9 – Пространственное распределение  $S_{вых}$

Графики функции выхода  $S_{вых} = f(x)$  построены относительно следующих параметров задачи:

- $A = 10$ , м;
- $k = 0.2$ , м/сут;
- $\eta = 0.2 \cdot 10^{-6}$ , 1/м.

Так как полученный с использованием косинуса в функции входного воздействия результата дает знакопеременные изменения уровня жидкости в пласте, предлагается внести в функцию входного воздействия следующие изменения:

$$S_{ex}(x) = \sum_n^{\infty} A_n \cdot (1 + \sin(\psi_n \cdot x)) \quad (9)$$

На рисунке 1.11 представлено распределение функции выхода  $S_{вых}$  в пространстве.

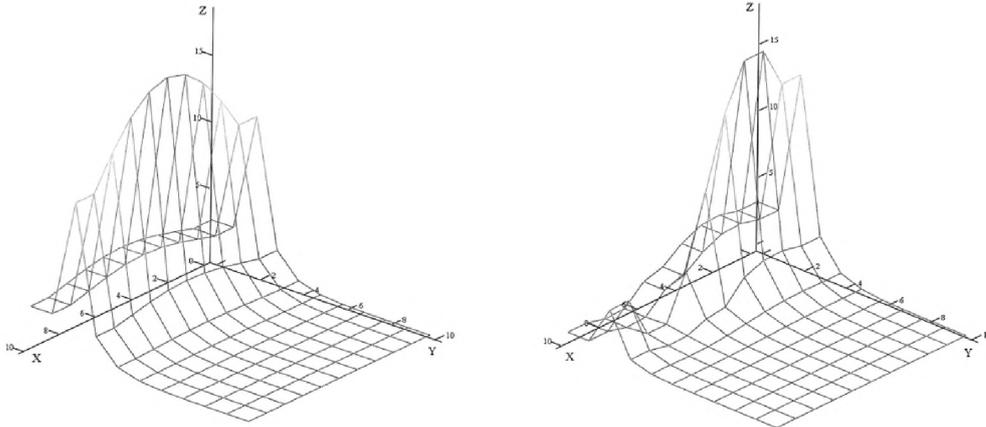


Рисунок 1.11 – Пространственное распределение  $S_{вых}$

Результаты расчета реакции объекта на входное воздействие гармоник более высоких порядков незначительно влияет на результат моделирования, поэтому его представление в модельном примере нецелесообразно [65]. Однако, при реальной разработке математической модели объекта их изучение необходимо, так как позволяет выявить порог неустойчивости системы. Анализ полученных результатов позволяет сформулировать ряд выводов:

1. Учитывая, что при определении протяженности пласта месторождения часто возникают проблемы, а гидродинамические параметры в большинстве случаев известны, для получения приближенного соответствия моделируемого и природного объектов соотношение геометрических сторон может быть условно представлено как  $L_{x,y} \geq 3L_z$ .

2. Исследования разной постановки условий распределения гармоник входного воздействия показали, что результаты моделирования с использованием функций косинуса и синуса соотносимы и могут варьироваться в зависимости от объекта моделирования. Для обоих способов представления входного воздействия была подтверждена пространственная инвариантность объекта и получен градиент убывания значения  $S_{вых}$  по мере удаления от области приложения входного воздействия.

### 3.2. Основные виды математических моделей систем и способов их взаимодействия (лекция)

Основой модели является дифференциальное уравнение в частных производных (уравнение 1.1), разработанное на базе уравнения теплопроводности. Данное уравнение описывает процесс геофильтрации и в общем виде может быть представлено следующим образом:

$$\eta^* \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $\eta^*$  - упругость породы, 1/м;

$k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам, м/сут;  
 $H(x, y, z, t)$  - функция напора, м.

Данное уравнение описывает процесс геофильтрации в трехмерном объекте, но при его использовании в моделировании сложных гидрогеологических объектов возникают следующие проблемы:

- недостаточность параметрического обеспечения модели;
- сложность вычислительной схемы.

В качестве решения проблемы трехмерное представление объекта заменяется двумерным. Двумерное уравнение, описывающее процесс геофильтрации принимает следующий вид:

$$\mu^* \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( km_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( km_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + b_k \times (H_k - H) + b_n \times (H_n - H),$$

где  $\mu^*$  - упругость пласта, (коэффициент формируется из следующего соотношения  $\mu^* = m\eta^*$ , где  $m$  – мощность пласта) [24];

$b_k, b_n$  – коэффициент перетекания с кровли и основания моделируемого пласта;

$H_k, H_n$  – уровень напора в прилегающих пластах;

$k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты фильтрации.

Некоторые упрощенные случаи потоков грунтовых вод (обычно в вертикальной проекции) могут быть описаны одномерным уравнением, которое может быть решено аналитически.

Принимая толщину единицы в перпендикулярном направлении к проекции на бумаге, дебит ( $q$ ) (за единицу ширины) для водоносного слоя со средней толщиной пласта ( $b$ )  $q = b \cdot 1 \cdot v$ , где, согласно закону Дарси, скорость ( $v$ ) может быть представлен в следующем виде:

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

где  $h$ , потенциметрический поток, измеренный выше данной величины. Необходимо обратить внимание на то, что фактическое значение  $h$  не требуется, имеет значение только его градиент  $\frac{\partial h}{\partial x}$  по направлению потока  $x$ ;

$K$  - гидравлическая проводимость [62].

Следовательно, дебит  $q$  может быть представлен в следующем виде:

$$q = b \cdot K \frac{\partial h}{\partial x}$$

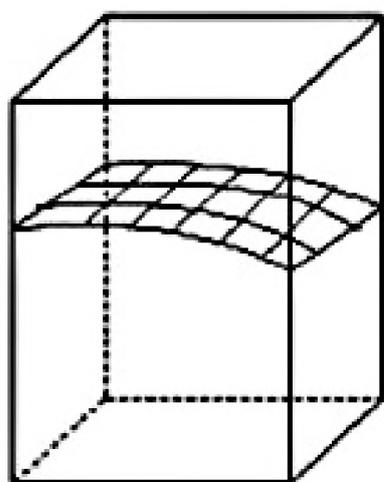
Частная производная  $h$  относительно  $x$  может быть описана как производная обычного вида, так как изменение  $h$  в направлении  $x$  не принимаем в представленном примере. Таким образом, выражение принимает следующий вид:

$$q = -b \cdot K \frac{\partial h}{\partial x}$$

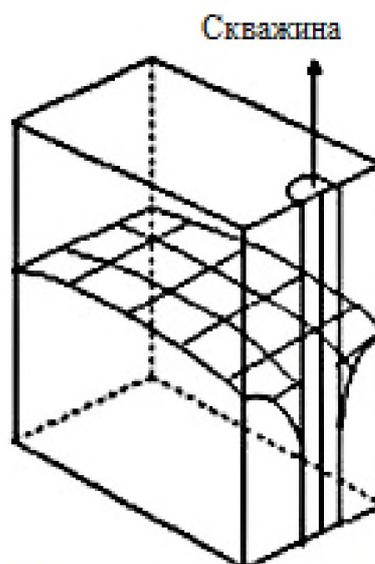
Таким образом, определив вид выражения, описывающего дебит, можно перейти к представлению потока в двумерном виде.

В большинстве случаев изменения в уровне грунтовых вод (для неограниченного потока) в пласте небольшие, что означает, что поток грунтовых вод не имеет большой вертикальной скоростной составляющей. Следовательно, для этих случаев может быть принята двухмерность потока. С другой стороны, там, где изменения в горизонте грунтовых вод больше, представление в трехмерной скоростной области было бы более точным, поскольку даже значительный вертикальный скоростной компонент потока исключается в горизонтальных направлениях. Данное различие показано на рисунке 1. В случае двухмерных потоков уравнение, как для неограниченных, так и для ограниченных водоносных горизонтов может иметь вид:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}.$$



Представление напора в пласте в двумерном виде



Представление напора в пласте в трехмерном виде

Рисунок 1 – Различия между слабым и сильным гидравлическим градиентом горизонта подземных вод

Существует один случай, отмеченный для изменения гидравлического напора в неограниченном водоносном горизонте. Изменение мощности водоносного горизонта также изменяет проводимость пласта  $T$ , которая представлена произведением гидравлической проводимости  $K$  и мощности пласта  $h$ . Общая форма уравнения для двухмерных неограниченных потоков известна как уравнение Буссинеска и представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t},$$

где  $S_y$  – удельная водоотдача.

Если спад в неограниченном водоносном горизонте слишком мал по отношению к мощности пласта, тогда переменная толщина водоносной зоны (мощности пласта,  $h$ ) может быть заменена средней толщиной  $b$ , которая, как предполагается, является постоянной по водоносному горизонту.

Для ограниченного водоносного горизонта в неустойчивых условиях, потенциометрическая поверхность уменьшается, мощность водоносного горизонта остается постоянной по времени и равна среднему значению  $b$ .

Для спокойного течения  $q$  не должен меняться в зависимости от времени  $t$ , или пространственной координаты  $x$ . Следовательно,

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -b \cdot K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

Принимая среднюю толщину пласта  $b$  и коэффициент фильтрации  $K$ , неизменными, вышеупомянутое уравнение можно упростить до:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

Данное уравнение может быть аналитически решено как:

$$h = C_1 x + C_2.$$

Выбирая направление  $x$  и местоположение скважины А (как показано на рисунке 1.1), имея также гидравлический напор  $h_a$  - гидравлический напор в скважине В, расположенной на расстоянии  $L$  от скважины в направлении оси  $X$  и имея гидравлический напор  $h_b$ , можно получить следующее выражение:

$$h_a = C_1 \cdot 0 + C_2;$$

$$h_b = C_1 \cdot L + C_2.$$

Данное выражение может иметь следующий вид:

$$C_1 = \frac{h_b - h_a}{L}; C_2 = h_a.$$

Таким образом, аналитическое решение уравнения, определяющего гидравлический напор  $h$ , можно представить в следующем виде:

$$H = \frac{h_b - h_a}{L} x + h_a.$$

После определения вида выражения гидравлического напора при двухмерном представлении потока предлагается рассмотреть представление гидравлического напора при трехмерном представлении потока.

Рассмотрим поток грунтовых вод, определенный в пределах куба со сторонами  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , которые можно также назвать элементарными объемами контроля насыщенного водоносного горизонта.

На внешних границах объекта граничные условия заданы как  $Q = const$ . Граничные условия описывающие взаимодействие пластов между собой представлены как  $Q = f(H)$ . В представленной системе уравнений функции напора используются в смежных водоносных горизонтах. Также вводится  $W_a$  - инфильтрационное питание верхнего пласта. Точность результатов, полученных с помощью данной модели, составила более 80%. Таким образом можно перейти к рассмотрению методам трехмерного описания гидрогеологических объектов.

Предполагается, что плотность воды  $\rho$  не изменяется в пространстве по трем направлениям (вода принята несжимаемой). Скоростные компоненты в  $x$ ,  $y$  и  $z$  указаниях были обозначены как  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  соответственно.

Так как вода принята несжимаемой, объем поступающей жидкости в моделируемой области (кубе) равен объему воды на выходе. Притоки и оттоки воды определены и представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Представление притока и оттока жидкости в пласте

Притоки:		Оттоки:	
По направлению $x$ :	$\rho V_x(\Delta y \cdot \Delta z)$	По направлению $x$ :	$\rho \left( V_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \Delta x \right) (\Delta y \cdot \Delta z)$
По направлению $y$ :	$\rho V_y(\Delta x \cdot \Delta z)$	По направлению $y$ :	$\rho \left( V_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \right) (\Delta x \cdot \Delta z)$
По направлению $z$ :	$\rho V_z(\Delta x \cdot \Delta y)$	По направлению $z$ :	$\rho \left( V_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \right) (\Delta y \cdot \Delta x)$

Чистый массовый поток, проходящий в единицу времени через заданный куб, можно представить в виде следующего уравнения:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

Уравнение (1.5) является уравнением непрерывности потока. Непрерывность потока обусловлена различием в потенциметрической энергии на единицу длины по направлению потока. Отношение скорости с потенциметрическим градиентом изначально было сформулировано Генри Дарси в середине девятнадцатого века. Он экспериментально вычислил, что разгрузка  $Q$ , проходящая через поверхность поперечного сечения канала, заполненного пористым материалом, пропорциональна различию гидравлического напора  $h$  между этими двумя конечными точками и обратно пропорциональна длине стока  $L$  [15].

Можно отметить, что полная энергия в любой точке потока грунтовых вод за единицу массы дана как:

$$h = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g},$$

где  $Z$  – отметка точки выбранной данной величины,

$\frac{p}{\gamma}$  - полная энергия давления,

$\frac{v^2}{2g}$  - полная энергия скорости.

Так как скорость потока грунтовых вод обычно низка,  $\frac{v^2}{2g}$  пренебрегают и

$h = Z + \frac{p}{\gamma}$  принимают как полную потенциметрическую энергию (рисунок 2).

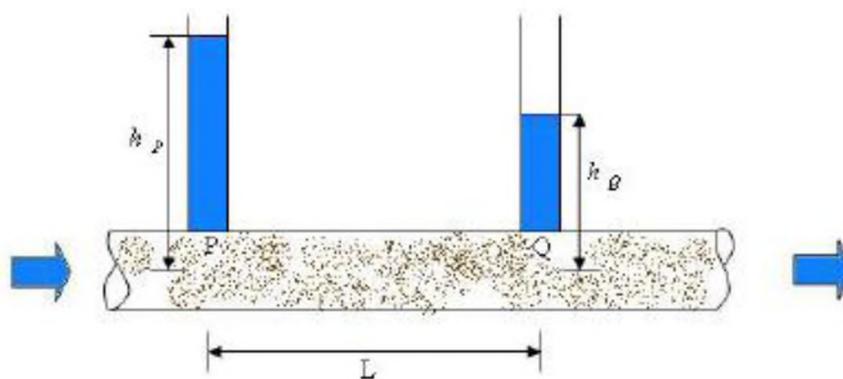


Рисунок 2 – Течение через насыщенную пористую среду

Исходя из уменьшения гидравлического напора в направлении потока, представление скорости потока жидкости можно представить в виде:

$$Q = -K \cdot A \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial l} \right),$$

где  $\frac{dh}{dl}$  - гидравлический градиент.

У коэффициента  $K$  есть измерения  $\frac{L}{T}$  или скорость, которую называют гидравлической проводимостью. Таким образом, представление скорости потока жидкости будет выглядеть как:

$$v = \frac{Q}{A} = -K \left( \frac{\partial h}{\partial l} \right).$$

Необходимо отметить, что данная скорость отличается от скорости воды, текущей через открытую трубу. В открытой трубе воду полностью передает все поперечное сечение трубы [101]. В том случае как если труба наполнена пористым материалом, например песком, вода может проходить только через поры частиц песка. Следовательно, скорость, полученная выражением (1.6), является только приблизительной скоростью, так как фактическая скорость жидких частиц, проходящих через пустоты пористого материала гораздо меньше. В большинстве случаев, происходит замена выражения для скорости течения жидкости в трех данных направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  по принципу, показанному в уравнении 1.6 так, чтобы каждый вектор скорости был пропорционален гидравлическому градиенту в соответствующем направлении, что дает возможность преобразовать данное уравнение в следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0.$$

В данном уравнении гидравлическая проводимость (коэффициент фильтрации) дана в трех направлениях ( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ), которые, как и предполагалось, отличались для общей анизотропной среды. При рассмотрении изотропной среды с постоянной

гидравлической проводимостью во всех направлениях уравнение непрерывности может быть упрощено до следующего выражения:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

В уравнении 1.7 предполагается, что гидравлический напор не изменяется со временем, то есть преобладает устойчивое состояние. В свою очередь, если предположить, что основной потенциометрический напор изменится во времени в точке управляющего воздействия, то произойдет соответствующее изменение в пористости водоносного горизонта, даже если жидкая плотность принята неизменной.

Неустойчивость потока в водоносных горизонтах, может произойти вследствие следующих факторов:

- изменение гидравлического напора (для неограниченного водоносного пласта) или потенциометрического максимума (для ограниченного водоносного слоя);
- сжимаемость минеральных зерен почвенной основы, формирующей водоносный горизонт;
- сжимаемости жидкости, сохраненной в пустотах почвенной основы.

Визуальное изображение данных факторов показано на рисунке 1.6, где учитывается увеличение гидравлического напора, сжатие почвенной основы и внутрипоровой жидкости [79].

Так как сохраняемость  $S$  ограниченного водоносного пласта была определена как  $S = b\gamma(\alpha + n\beta)$ , то уравнение потока для ограниченного водоносного пласта было упрощено до следующего вида:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = \frac{S}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Определим проводимость пласта  $T$ , ограниченного водоносным слоем, как произведение гидравлической проводимости  $K$  и мощности водоносного горизонта  $b$ :  $T = K \cdot b$ .

Далее уравнение потока упрощается для ограниченного водоносного горизонта до следующего вида:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Для неограниченных водоносных слоев сохраняемость  $S$  задана следующим выражением:

$$S = S_y + hS_s,$$

где  $S_y$  – удельная водоотдача;

$S_s$  – удельный объем, равный  $\gamma(\alpha + n\beta)$ .

Обычно удельный объем жидкости ( $S_s$ ) намного меньше по величине, чем удельная водоотдача пласта ( $S_y$ ), что дает возможность пренебречь этой величиной.

Следовательно, сохраняемость слоя ( $S$ ) при условиях горизонта грунтовых вод для всех практических целей может быть выбрана равной  $S_y$ .

В условиях неопределенности уравнение массопереноса при обычном распределении потока воды имеет вид:

$$\rho \left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial M}{\partial t}.$$

Уравнение описывает изменение гидравлического напора от суммарного влияния факторов времени и пористости окружающей среды, увеличивающей гибкость потока воды. С учетом пористости  $n$  и времени  $t$ , выражение, описывающее изменение массы воды  $M$ , принимает следующий вид:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n \Delta x \Delta y \Delta z).$$

Принимая во внимание деформацию вдоль оси  $\Delta z$ , показатель которой не влияет на контрольный объем в заданной области  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , вышеупомянутое выражение принимает вид:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n \Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\partial}{\partial t} (n \Delta z) \cdot \rho \Delta x \Delta y,$$

где плотность воды  $\rho$  со временем меняется.

В отношении меняющегося объема воды  $V_w$  свободное пространство задается как отношение следующего вида:

$$\frac{\partial(V_w)}{V_w} = - \frac{\partial \rho}{\rho}.$$

Отрицательное значение показывает, что снижение интенсивности потока означает увеличение плотности относительно соответствующего исходного значения.

Коэффициент сжатия воды  $\beta$  задан в следующем виде:

$$\beta = - \frac{\left[ \frac{\partial(V_w)}{V_w} \right]}{\partial p},$$

где  $\partial p$  это изменение гидравлического напора  $p$  таким образом, чтобы  $\beta = \frac{\partial \rho}{\rho \partial p}$ , что значит, что  $\partial \rho = \rho \partial p \beta$ .

Коэффициент сжатия почвенной основы  $\alpha$  определен как обратное значение  $E_s$  (упругость почвы), следовательно:

$$\frac{1}{\alpha} = E_s = - \frac{\partial(\sigma_z)}{\frac{\partial(\Delta z)}{\Delta z}},$$

где  $\sigma_z$  напряжение в зернах почвы.

Теперь давление газа в отношении ( $p$ ) и напряжение в твердых частицах ( $\sigma_z$ ) должно быть объединено для поддержки суммарной массы воды, лежащей выше вертикальной границы заданной интенсивности. Таким образом, соотношение

$p + \sigma_z = const$  приводит к равенству  $d\sigma_z = -dp$ , что дает возможность представить выражение в следующем виде:

$$\frac{1}{\alpha} = -\frac{\delta p}{\frac{\partial(\Delta z)}{\Delta z}}$$

Первая переменная, меняющаяся в массе (М) воды содержащаяся в исходном объеме (уравнение 1.4) это  $\frac{\partial p}{\partial t} n \Delta x \Delta y \Delta z$ , что на основании полученных ранее выводов эквивалентно  $n \cdot \rho \cdot \beta \frac{\partial p}{\partial t} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z$ .

Если объем твердых частиц почвы  $V_s$  представлен как  $V_s = (1 - n) \Delta z \Delta y \Delta x$ , то  $\delta V_s = [\partial(\Delta z) - \delta(n \Delta z)] \Delta x \Delta y$ .

Принимая во внимание, что коэффициент упругости частиц почвы может быть сравним с коэффициентом упругости воды, с учетом изменения пористости значение данных факторов может быть приравнено к нулю. Следовательно, можно записать следующее выражение  $[\partial(\Delta z) - \delta(n \Delta z)] \Delta x \Delta y = 0$ , что также значит, что  $\partial(\Delta z) = \delta(n \Delta z)$ , которые могут быть заменены уравнением представления изменения массопереноса  $M$  от исходного объема в виде следующих выражений:

$$\frac{\partial(n \Delta z)}{\partial t} \cdot \rho \Delta x \Delta y = \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} \cdot \rho \Delta x \Delta y = \rho \frac{\frac{\partial(\Delta z)}{\Delta z}}{\partial t} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = \rho \alpha \frac{\partial p}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Также вычисления изменения массопереноса  $M$  в заданном кубе принимают следующий вид:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (\alpha + n\beta) \cdot \rho \frac{\partial p}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z. \tag{3}$$

Объединение уравнения (3) с уравнением непрерывности потока в пределах заданной моделируемой области (куба) (уравнение 1.16), представляет следующее отношение:

$$-\rho \left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = (\alpha + n\beta) \rho \frac{\partial p}{\partial t}$$

Принимая изотропную среду как  $K_x = K_y = K_z = K$  и, применяя закон распределения Дарси в трех заданных направлениях, уравнение 1.6 может быть упрощено до следующего вида:

$$K \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = (\alpha + n\beta) \rho \frac{\partial p}{\partial t}$$

Теперь, так как потенциметрический (или гидравлический) максимум  $h$  задан в виде:

$$h = Z + \frac{P}{\gamma},$$

то уравнение потока может быть представлено в следующем виде:

$$K \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = (\alpha + n\beta) \frac{\gamma}{K} \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Данное уравнение – это общее уравнение потока в трех измерениях для гомогенной пористой среды. Уравнение было получено на основе заданного куба, который может быть частью неограниченного или ограниченного водоносного горизонта.

### 3.3. Способы преобразования и математического описания структурных схем

(лекция)

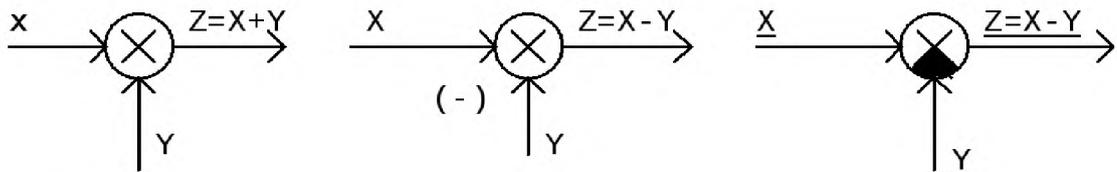
При исследовании и проектировании автоматических систем управления широко используются структурные схемы, дающие наглядное представление о связях между звеньями, о прохождении и преобразовании сигналов в системе.

Структурной схемой в теории автоматического управления называют графическое изображение системы управления в виде совокупности динамических звеньев с указанием связей между ними. Структурная схема может быть составлена на основе известных уравнений системы и, наоборот, уравнения системы могут быть получены из структурной схемы. При этом первая задача может иметь различные варианты решения ( различные структурные схемы ), вторая задача всегда имеет единственное решение.

Звено на структурной схеме условно обозначают в виде прямоугольника с указанием входных и выходных величин, а также передаточной функции внутри него.

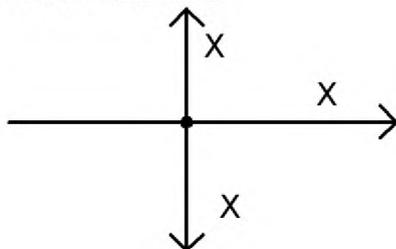


Алгебраические сумматоры изображаются в виде круга, разделенного на секторы. К секторам подводятся стрелки, рядом с которыми указываются слагаемые. Сумма обозначается стрелкой выходящей из одного из секторов. Отрицательное слагаемое обозначается либо знаком "-" у острия стрелки, либо затемнением сектора.



сектора.

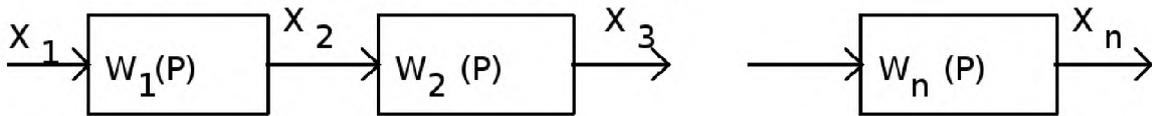
В структурных схемах используются также узлы ( точки разветвления сигналов ), обозначаемые точками на линиях связи. Всем отходящим от узла стрелкам соответствует одна и та же величина.



#### 1.2. Основные правила преобразования структурных схем.

### 1.2.1. Последовательное соединение звеньев.

При последовательном соединении выходная величина каждого предшествующего звена является входным воздействием последующего звена.



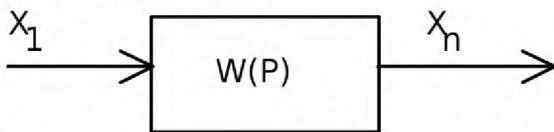
Записав уравнения звеньев

$$X_2 = W_1(P) \cdot X_1; X_3 = W_2(P) \cdot X_2; \dots X_n = W_{n-1}(P) \cdot X_{n-1}$$

и исключив из системы уравнений переменные  $X_2, X_3, \dots, X_{n-1}$ , получим:

$$X_n = [W_1(P) \cdot W_2(P) \cdot \dots \cdot W_n(P)] \cdot X_1$$

Таким образом группу последовательно соединенных звеньев можно заменить одним звеном с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций отдельных звеньев, то есть

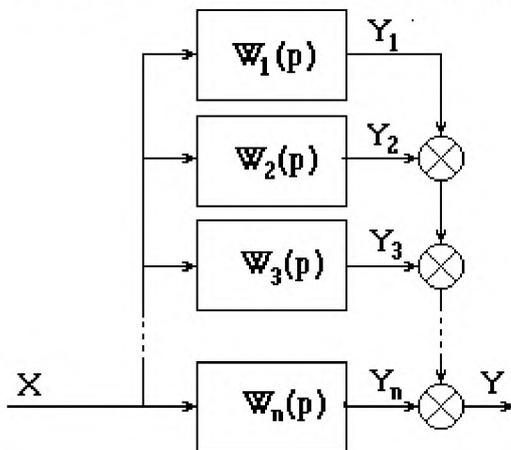


где

$$X_n(P) = \prod_{i=1}^n W_i(P) \cdot X_1(P)$$

### 1.2.2 Параллельное соединение звеньев.

При параллельном соединении на вход всех звеньев подается один и тот же сигнал. Выходные сигналы складываются и их сумма образует выходной сигнал.



$$Y_1 = W_1(P) \cdot X; Y_2 = W_2(P) \cdot X; \dots, Y_n = W_n(P) \cdot X$$

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n = [W_1(P) + W_2(P) + \dots + W_n(P)] \cdot X$$

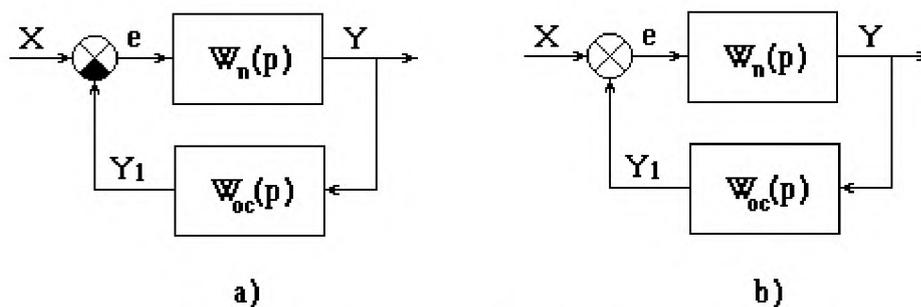
Таким образом, группу параллельно соединенных звеньев можно заменить одним звеном с передаточной функцией, равной сумме передаточных функций отдельных звеньев.

$$Y(P) = \sum_{i=1}^n W_i(P) \cdot X(P)$$

### 1.2.3. Звено, охваченное обратной связью.

Принято считать, что звено охвачено обратной связью, если его выходной сигнал через какое-либо другое звено подается на вход. Если сигнал  $Y_1$  обратной связи

вычитается из входного воздействия, т.е.  $e = X - Y_1$ , то обратную связь называют отрицательной.



Передаточная функция разомкнутой системы  $W_{раз}(P)$  равна произведению передаточной функции  $W_n(P)$  прямой цепи и передаточной функции  $W_{oc}(P)$  обратной связи

$$W_{раз}(P) = W_n(P) \cdot W_{oc}(P)$$

С учетом последнего выражения передаточная функция замкнутого контура с обратной связью принимает вид:

$$W(P) = \frac{W_n(P)}{1 \pm W_{раз}(P)}$$

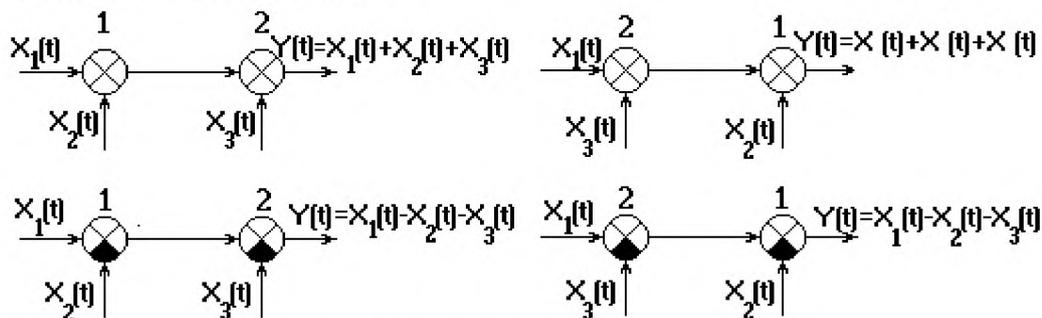
Знак “-” в знаменателе ставится в том случае, если обратная связь является положительной.

### 3. Прочие правила преобразования структурных схем.

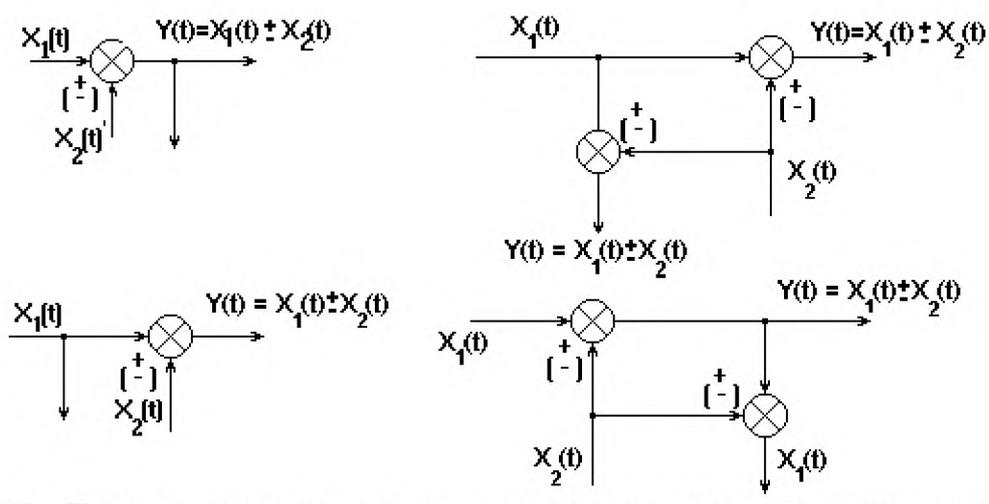
В тех случаях, когда структурная схема оказывается сложной и содержит много различных перекрестных связей, возникает необходимость преобразования, т.е. упрощения и сведения ее к простейшему виду. Преобразование структурных схем линейных систем осуществляется на основе некоторых правил, которые перечислены ниже

#### 3.1. Перестановка сумматоров и элементов сравнения.

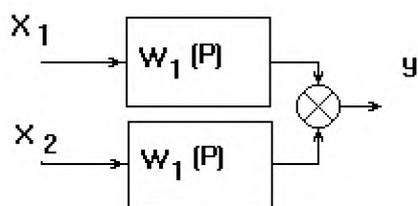
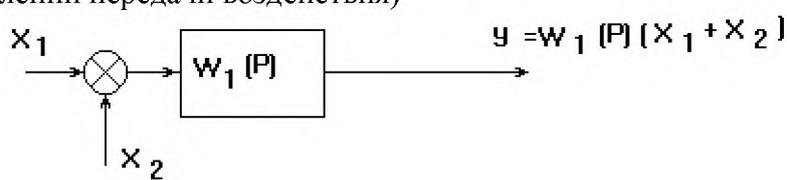
Элементы сравнения или сумматоры, в которых осуществляется алгебраическое суммирование, можно менять местами.



#### 3.2. Правило перестановки сумматоров и узлов.

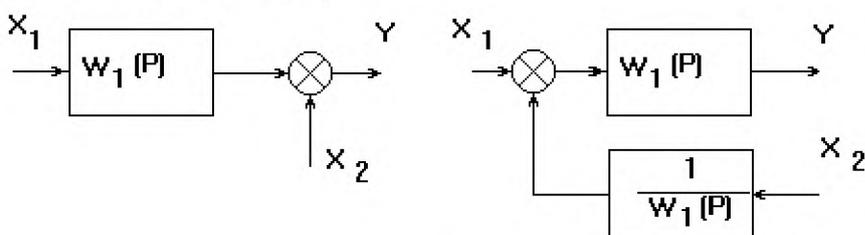


3.3. Перенос сумматора со входа звена на выход ( перенос через звено в направлении передачи воздействия)



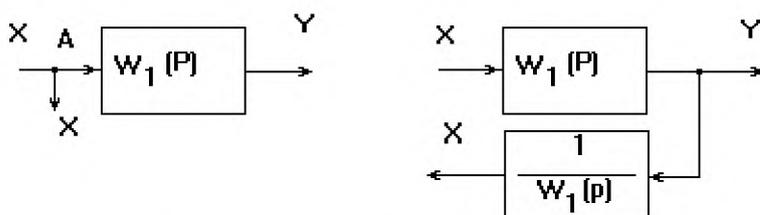
$$Y = W_1(P) \cdot X_1(P) + W_1(P) \cdot X_2(P) = W_1(P) \cdot [X_1(P) + X_2(P)]$$

3.4. Перенос сумматора с выхода звена на его вход (перенос через звено против направления передачи сигнала).

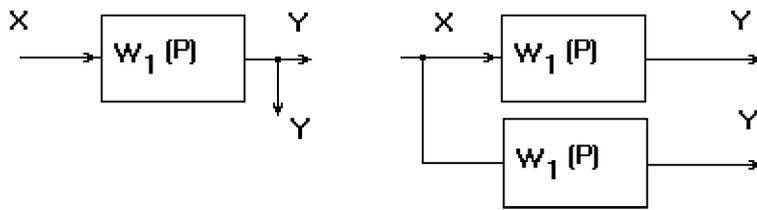


$$Y = W_1(P) \cdot X_1 + X_2$$

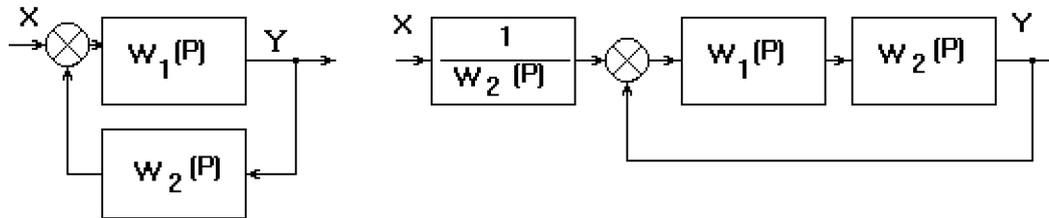
3.5. Перенос узла со входа звена на его выход ( перенос в направлении передачи воздействия).



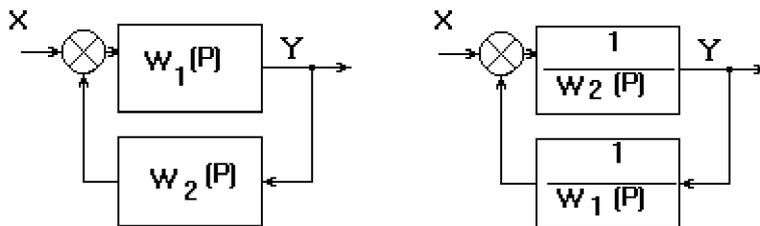
3.6. Перенос узла с выхода звена на его вход ( перенос против направления передачи сигнала).



### 3.7. Переход к единичной обратной связи



### 3.8. Замена звеньев прямой и обратной цепей.



Данные схемы используются при исследовании САУ. Применяя рассмотренные правила преобразования структурных схем, можно любую многоконтурную структурную схему, в том числе и с перекрещивающимися контурами, привести к одноконтурному виду и затем свернуть в одно динамическое звено, передаточная функция которого будет являться передаточной функцией исходной многоконтурной системы.

## 3.4. Методы моделирования входного воздействия распределенного по одной пространственной координате (лекция)

Система автоматического регулирования (САР) – автоматическая система с замкнутой цепью воздействия (см. рис Структурная схема простейшей системы регулирования), в котором управление  $Y$  вырабатывается в результате сравнения истинного значения ( $PV=X$ ) с заданным значением  $SP$ . Основное назначение САР заключается в поддержании заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону.

Дополнительная связь в структурной схеме САР (см. рис.1 Структурная схема простейшей системы регулирования), направленная от выхода к входу, называется обратной связью (ОС). Обратная связь может быть отрицательной или положительной.

Выходное воздействие ( $Y$ ) – воздействие, выдаваемое на выходе системы управления или устройства регулирования. В литературе по автоматизации также встречаются аббревиатуры, соответствующие данному определению:  $MV$  – Manipulated Variable – регулируемая (выходная) переменная,  $CO$  – Controlled Output – регулируемая (выходная) переменная или мощность.

Задающее воздействие ( $SP$  – Set Point Value,  $W$ ,  $W_x$ ,  $W_v$ ) – воздействие на систему, определяющее требуемый закон изменения регулируемой величины.

Возмущающее воздействие ( $Z$ ) – воздействие, стремящееся нарушить функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной.

Замечание

Главное назначение систем автоматической стабилизации – компенсация внешних возмущающих воздействий.

Классификация видов возмущающих воздействий, действующих на систему управления или регулирования, приведена в таблице 2:

Таблица 2 - Классификация видов возмущающих воздействий

Классификация	Вид воздействия	возмущающего	Место возмущения	приложения	Примечания
1 По характеру изменения во времени	Медленно меняющиеся Импульсные случайные				
	Низкочастотные возмущения	случайные	Поступают на объекта управления	на вход	
	высокочастотные (шумы)		Поступают на объекта управления	на выход	Необходима фильтрация шумов

Примечания.

1. В зависимости от характера преобладающих возмущений и типа системы управления выбирается и соответствующий критерий оптимизации настроек регулятора.

2. На практике возмущения по нагрузке чаще всего компенсируются соответствующим

перемещением регулирующего органа, изменяющего расход вещества или количества подводимой энергии к объекту управления. Поэтому такое возмущение и приводят ко входу объекта, а его величину измеряют в процентах хода регулирующего органа.

Рассогласование регулирования ( $E = SP - PV = SP - X$ ) – разность между заданным (SP) и действительным (PV) значением регулируемой величины.

Отклонение регулирования ( $E = PV - SP = X - SP$ ) – разность между действительным (PV) значением и заданным (SP) значением регулируемой величины.

Статическое регулирование. При статическом регулировании регулируемая величина (например, температура), находящаяся под влиянием различных внешних воздействий (подача напряжения на ТЭН или подача охлаждающей жидкости) на регулируемый объект по окончании переходного процесса, принимает неодинаковые значения, зависящие от величины воздействия.

Характерные особенности статической системы регулирования следующие:

1. равновесие системы возможно при различных значениях регулируемой величины;

2. каждому значению регулируемой величины соответствует определенное положение регулирующего органа.

Астатическое регулирование. При астатическом регулировании нет определенной связи между положением регулирующего органа и установившимся значением регулируемой величины. При астатическом регулировании при различных по величине значениях внешнего возмущающего воздействия (нагрузки) на объект по окончании переходного процесса восстанавливается значение регулируемой величины.

Характерные особенности астатической системы регулирования следующие:

1. равновесие системы возможно только при единственном значении регулируемой величины (например, уровня), причем это значение равно заданному;

2. регулирующий орган (например, клапан, заслонка) должен иметь возможность занимать различные положения при неизменном значении регулируемой величины.

У астатических регуляторов отсутствует статическая ошибка и регулируемая величина остается равной заданной с точностью, соответствующей нечувствительности регулятора для всех равновесных состояний системы.

Входные воздействия на распределенные объекты (системы) делятся на импульсные (дельта функции) и гармонические (комбинации синусов и косинусов).

Импульсные входные воздействия, как правило, применяют, если объект управления описывается с использованием функций Грина.

Гармонические (комбинации синусов и косинусов) входные воздействия, как правило, применяют, если распределенный объект описывается дифференциальными уравнениями в частных производных.

Рассмотрим формирование входных воздействий на распределенный объект в зависимости от его структуры и граничных условий.

Положим, что имеется объект представленный на рисунке:



Представим входное воздействие на него в виде ряда Фурье по пространственной координате, в соответствии с указанными граничными условиями, и построим графики зависимостей амплитуды входного воздействия от координаты  $x$  (при  $0 \leq x \leq Lx$ , где  $Lx$  - длина объекта (области распределения входного воздействия) по 1ой, 2-ой, 3-ей, 4-ой и 5ой модам, а также их сумму.

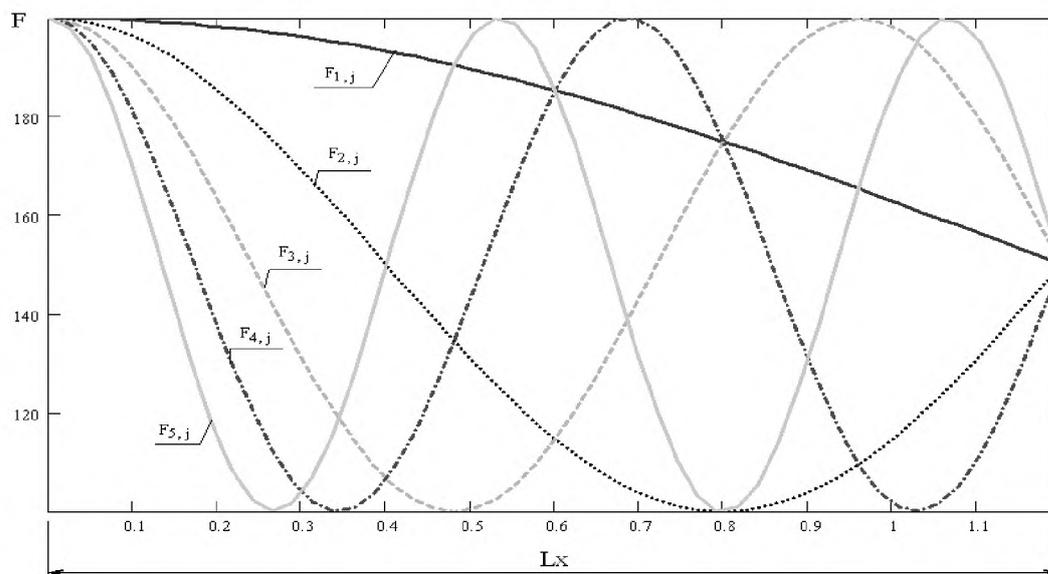
С учетом указанных на рисунке граничных условий представим входное воздействие на объект в виде следующего соотношения:

$$F_{i,j}(x) = A_i + B_{i,j},$$

где  $i \in (1, \infty)$ ,  $j \in (1, N)$ ,  $N$  - кол-во шагов дискретизации по координате  $x$ .

Вследствие того, что на одной из границ имеется постоянная температура равная 150, то параметр  $A_i = 150$ . Т.к. левая и правая границы заданы различными условиями то функция  $B_{i,j} = U_i \cdot \cos(\psi_i \cdot x_j)$ , где  $\psi_i = \frac{\pi \cdot (i - 0.5)}{Lx}$ ,  $i \in (1; \infty)$ , но в нашем случае  $i \in (1; 5)$ ,  $x_j = \Delta x \cdot j$ , где  $\Delta x$  - шаг дискретизации по координате  $x$ .

Решая полученное уравнение, для каждого  $i$ , получим следующие графики:



Графики зависимостей  $F_{i,j}(x)$  при  $i \in (1:5)$

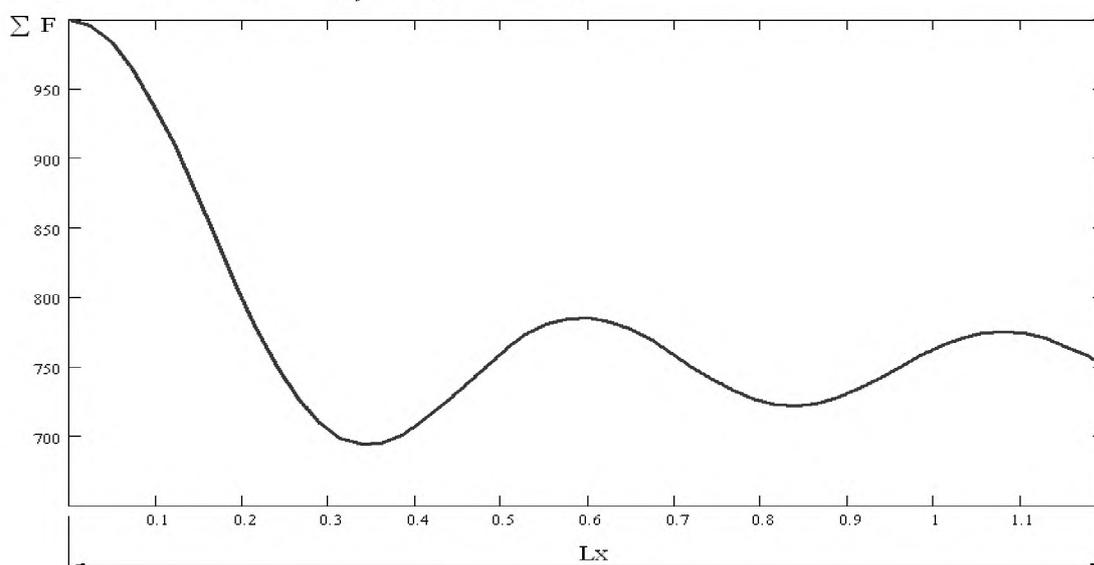


График зависимости  $\sum_{i=1}^5 F_{i,j}(x)$ .

### 3.5. Методы моделирования входного воздействия распределенного по двум пространственным координатам (лекция)

Типовое линейное уравнение второго порядка, моделирующее поведение функции состояния  $Q(x,t)$  пространственно одномерного объекта с распределенными параметрами может быть представлено в форме:

$$x_0 < x < x_1; t > 0;$$

с начальными и граничными условиями:

$$A \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + A_1 \frac{\partial Q}{\partial t} = C \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + B_1 \frac{\partial Q}{\partial x} + C_1 Q + f(x,t,u(x,t))$$

$$Q(x,0) = Q_0^{(0)}(x); \quad \frac{\partial Q(x,0)}{\partial t} = Q_0^{(1)}(x); \quad x_0 \leq x \leq x_1;$$

$$\alpha(x_0, t)Q(x_0, t) + \beta(x_0, t) \frac{\partial Q(x_0, t)}{\partial x} = g_0(t, u_0(t)), \quad t > 0;$$

$$\alpha(x_1, t)Q(x_1, t) + \beta(x_1, t) \frac{\partial Q(x_1, t)}{\partial x} = g_1(t, u_1(t)), \quad t > 0.$$

В роли входных воздействий кроме функций  $f, g_0, g_1$  могут фигурировать соответствующие управления  $u(x, t), u_0(t), u_1(t)$ . Граничные управления  $u_0(t), u_1(t)$  для одномерного объекта, сконцентрированные в точках  $x_0$  и  $x_1$  на границах отрезка, представляют собой сосредоточенные воздействия, изменяющиеся только во времени  $t$ . Управления  $u(x, t)$  могут представлять собой как независимые от пространственных координат управления (сосредоточенные), так и пространственно-временные воздействия. Основное соотношение, связывающее выход объекта при заданном начальном состоянии с входными воздействиями, определяется общим решением краевой задачи, которое может быть представлено в следующей интегральной форме:

$$Q(x, t) = \int_{x_0}^{x_1} N_0(x, \xi, t) Q_0^{(0)}(\xi) d\xi + \int_{x_0}^{x_1} N_1(x, \xi, t) Q_0^{(1)}(\xi) d\xi +$$

$$+ \int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x, \xi, t, \tau) f(\xi, \tau, u(\xi, \tau)) d\xi d\tau + \int_0^t K_0(x, t, \tau) g_0(\tau, u_0(\tau)) d\tau +$$

$$+ \int_0^t K_1(x, t, \tau) g_1(\tau, u_1(\tau)) d\tau, \quad x \in (x_0, x_1), t > 0;$$

где  $\xi$  и  $\tau$  – переменные интегрирования, соответственно, по пространственной координате и времени. Первые два интеграла по пространственной переменной определяют составляющую общего решения, которая описывает влияние на  $Q(x, t)$  начальных распределений  $Q_0^{(0)}(x)$  и  $Q_0^{(1)}(x)$ . Последние два интеграла по времени учитывают сосредоточенные входные воздействия  $g_0$  и  $g_1$  по граничным условиям. Двойной интеграл по пространственно-временной области изменения пространственного и временного аргументов распределенного входного воздействия  $f$  отражает вклад входного воздействия в реакцию объекта. Выход объекта  $Q(x, t)$  связывается с внешними воздействиями  $f, g_0, g_1$  и начальным состоянием  $Q_0(x)$  соответствующими ядрами линейных интегральных операторов  $N_0, N_1, G, K_0, K_1$ , которые отражают внутренние свойства объекта по отношению к соответствующим входам. Как следует из общей теории линейных уравнений в частных производных, все эти ядра могут быть выражены в конечном виде только через одну из них – функцию  $G(x, \xi, t, \tau)$ , называемую функцией Грина, которая является основной фундаментальной характеристикой объекта:

$$G(x; \xi; t; \tau) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2}{l^2} a^2 (t - \tau) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \frac{\pi n}{l} \xi.$$

Если в краевой задаче (1.7) – (1.10) начальные условия нулевые, а граничные условия однородные, то есть,

$$Q_0^{(0)}(x) \equiv Q_0^{(1)}(x) = 0, \quad x \in [x_0; x_1], \quad g_0(x, u_0(t)) \equiv g_1(x, u_1(t)) = 0$$

и функция  $f$  может быть представлена произведением дельта-функций:

$$f(x, t, u(x, t)) = \delta(x - \xi_0) \delta(t - \tau_0),$$

то в соответствии со свойствами дельта-функций, получим:

$$Q(x,t) = \int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t,\tau) \delta(\xi - \xi_0) \delta(\tau - \tau_0) d\xi d\tau = G(x,\xi_0,t,\tau_0). \quad (1.12)$$

Таким образом, функция Грина  $G(x,\xi_0,t,\tau_0)$  является решением краевой задачи:

$$\begin{aligned} A(x,t) \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + A_1(x,t) \frac{\partial Q}{\partial t} &= C(x,t) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + B_1(x,t) \frac{\partial Q}{\partial x} + C_1(x,t) Q + \\ &+ \delta(x - \xi_0) \delta(t - \tau_0) \\ &; x_0 < x < x_1; t > 0; \\ Q(x,0) = \frac{\partial Q(x,0)}{\partial t} &= 0; x_0 \leq x \leq x_1; \\ \alpha(x_0,t) Q(x_0,t) + \beta(x_0,t) \frac{\partial Q(x_0,t)}{\partial x} &= 0, t > 0; \\ \alpha(x_1,t) Q(x_1,t) + \beta(x_1,t) \frac{\partial Q(x_1,t)}{\partial x} &= 0, t > 0. \end{aligned}$$

и описывает реакцию управляемой распределенной системы с нулевыми начальными и однородными граничными условиями в любой точке  $x \in [x_0; x_1]$  и любой момент времени  $t \geq 0$  на точечное импульсное воздействие вида дельта-функции, приложенное в произвольной, но фиксированной точке  $\xi_0 \in [x_0; x_1]$  в момент времени  $t = \tau_0 \geq 0$ .

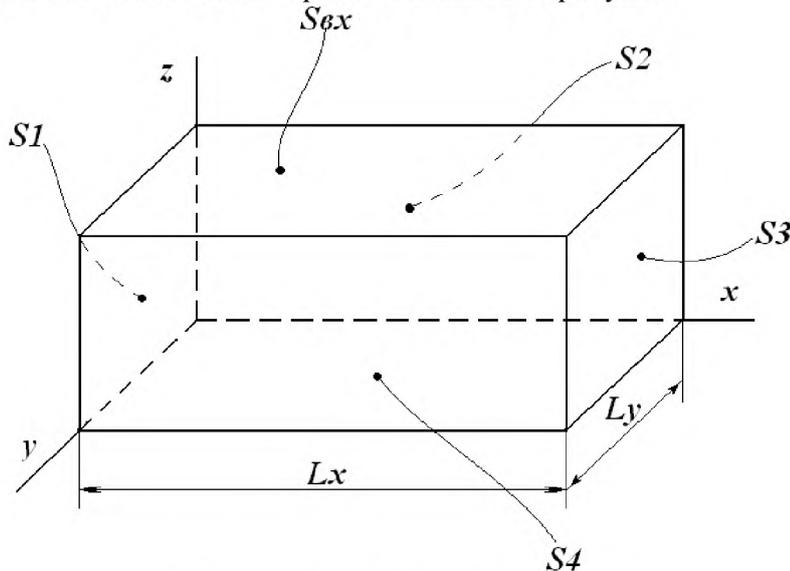
Входные воздействия на распределенные объекты (системы) делятся на импульсные (дельта функции) и гармонические (комбинации синусов и косинусов).

Импульсные входные воздействия, как правило, применяют, если объект управления описывается с использованием функций Грина.

Гармонические (комбинации синусов и косинусов) входные воздействия, как правило, применяют, если распределенный объект описывается дифференциальными уравнениями в частных производных.

Рассмотрим формирование входных воздействий на трехмерный распределенный объект в зависимости от его структуры и граничных условий.

Положим, что имеется объект представленный на рисунке:



Граничные условия заданы в виде:

$S_{vx}$	S1	S2	S3	S4	S5
q	1	1	0	0	0

Размеры объекта:  $Lx = 1.2$ ,  $Ly = 0.8$ ,  $Lz = 0.4$ .

Представим входное воздействие на него в виде ряда Фурье по пространственным координатам, в соответствии с указанными граничными условиями, и построим графики зависимостей амплитуды входного воздействия от координат  $x$  и  $y$  (при  $0 \leq x \leq Lx$ ,  $0 \leq y \leq Ly$ , где  $Lx, Ly$  - длина и ширина объекта, соответственно (области распределения входного воздействия) по выбранным модам, а также их сумму.

С учетом указанных на рисунке граничных условий представим входное воздействие на объект в виде следующего соотношения:

$$F_{i,j}(x) = A + B_{i,j}, \text{ где } i \in (1, \infty), j \in (1, \infty).$$

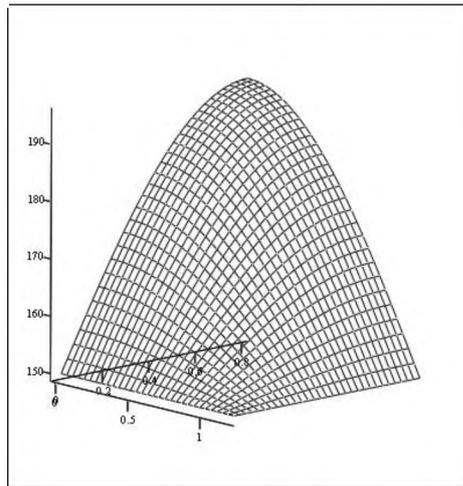
Вследствие того, что на одной из границ имеется постоянная температура равная 150, то параметр  $A = 150$ . Т.к. левая и правая границы заданы различными условиями то

функция  $B_{i,j} = 0.3A \cdot \cos(\psi_i \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\psi}_j \cdot y)$ , где  $\psi_i = \frac{\pi \cdot (i-0.5)}{Lx}$ ,  $\tilde{\psi}_j = \frac{\pi \cdot (j-0.5)}{Ly}$ ,

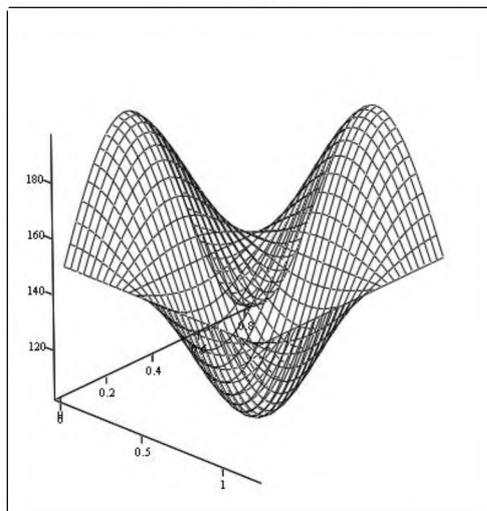
$i \in (1; \infty)$ ,  $j \in (1; \infty)$ , но в нашем случае  $i \in (1; 3)$ ,  $j \in (1; 5)$ ,  $x \in (0; Lx)$ ,  $y \in (0; Ly)$ .

Решая полученное уравнение, для каждого  $i$  и  $j$ , получим следующие графики:

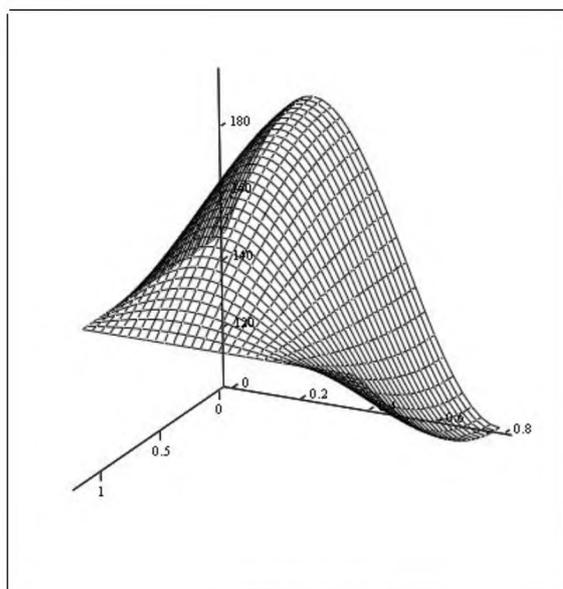
$$i = 1, j = 1$$



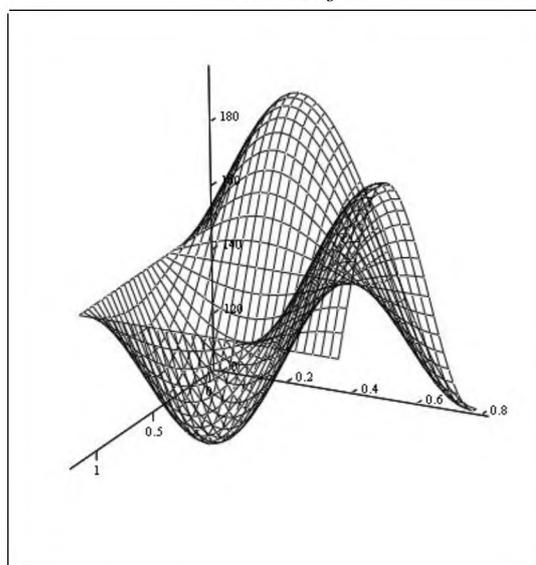
$$i = 2, j = 1$$



Графики зависимостей  $F_{i,j}(x, y)$   $i = 1, j = 2$



$$i = 2, j = 2$$



Графики зависимостей  $F_{i,j}(x, y)$ .

Описанная математическая модель и интегральное представление решения относятся к системам с непрерывным процессом функционирования, как во времени, так и в пространстве. Для дискретных распределенных систем рассмотренная математическая модель и интегральное представление решения могут служить основой для дальнейших исследований. В дискретных системах источники и датчики размещены в конкретных фиксированных точках, количество которых не является бесконечным, управляющие воздействия реализуются в определенные моменты времени.

### 3.6. Методы моделирования двумерного распределенного объекта

Имеется объект, уравнение теплопроводности которого можно представить в виде:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right), \quad (2.1)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, \tau > 0,$$

где  $a$  – заданный коэффициент,  $\partial\tau$  – шаг дискретизации по времени,  $\partial x$ ,  $\partial y$  – шаги дискретизации по координатам  $x$  и  $y$ , соответственно.

Внешне данный объект можно представить в виде:

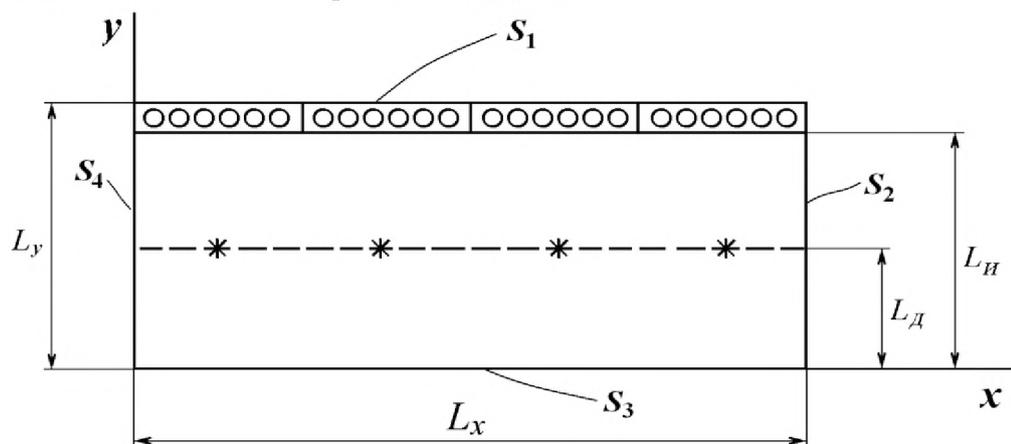


Рис. 3.1. Схематическое представление объекта.

Граничные условия, при которых следует решать уравнение (2.1), запишем в виде:

$$T(x, L_n, \tau) = U(x, \tau), \quad (0 \leq x \leq L_x), \quad \tau > 0 \quad S_1$$

$$T(0, y, \tau) = 0, \quad (0 \leq y \leq L_y), \quad \tau > 0 \quad S_2$$

(2.2)

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (0 \leq x \leq L_x), \quad \tau > 0 \quad S_3$$

$$T(L_x, y, \tau) = 0, \quad (0 \leq y \leq L_y), \quad \tau > 0 \quad S_2$$

где  $U(x, \tau)$  – управляющее воздействие.

Функцией выхода будет температурное поле  $T(x, L_d, \tau)$ .

Таблица 3.1

Исходные данные:

Lx	Ly	$\partial x$	$\partial y$	$\partial \tau$	a	$U(\tau)$
0.9	0.1	0.1	0.02	0.01	0.0001	100

Решать данное уравнение будем методом конечных разностей, преобразуя, получим:

$$\frac{\cdot T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{T_{i-1,j,k-1} - 2 \cdot T_{i,j,k-1} + T_{i+1,j,k-1}}{\partial x^2} + \frac{T_{i,j-1,k-1} - 2 \cdot T_{i,j,k-1} + T_{i,j+1,k-1}}{\partial y^2} \right), \quad (2.3)$$

Преобразуя, получим:

$$T_{i,j,k} = a \cdot \partial \tau \cdot \left( \frac{T_{i-1,j,k-1} - 2 \cdot T_{i,j,k-1} + T_{i+1,j,k-1}}{\partial x^2} + \frac{T_{i,j-1,k-1} - 2 \cdot T_{i,j,k-1} + T_{i,j+1,k-1}}{\partial y^2} \right) + T_{i,j,k-1},$$

(2.4)

$$1 < i < NX = 6, \quad 1 < j < NY = 10, \quad k > 1.$$

Дискретизацию объекта по соответствующим координатам будем проводить согласно следующему рисунку:

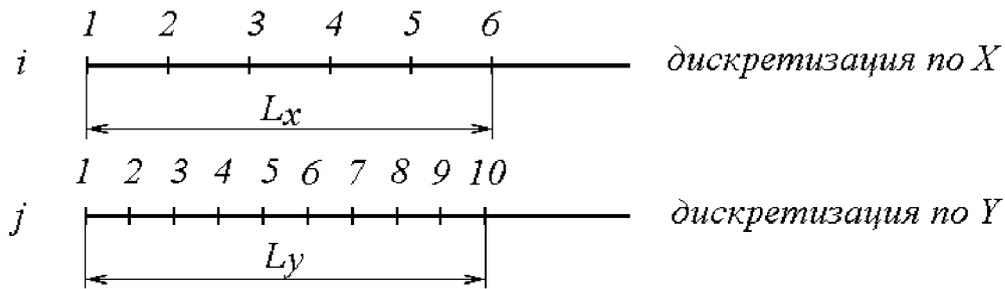


Рис. 3.2. Дискретизация по пространственным координатам.

В дискретном виде граничные условия примут вид:

$$T(i,1,k) = U(i,k), \quad 1 \leq i \leq 6, \quad k > 1 \quad S_1$$

$$T(0,j,k) = 0, \quad 1 \leq j \leq 10, \quad k > 1 \quad S_2$$

(2.5)

$$T(i,10,k) = T(i,9,k), \quad 1 \leq i \leq 6, \quad k > 1 \quad 3$$

$$T(6,j,k) = 0, \quad 1 \leq j \leq 10, \quad k > 1 \quad S_2$$

При этом уравнения (3.4) можно решить численными методами согласно блок-схеме представленной на рис. 3.3.

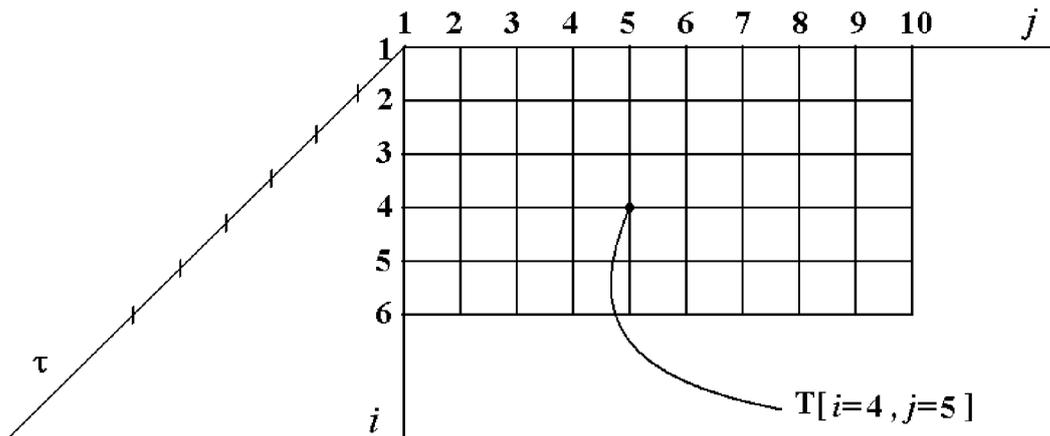


Рис. 3.4. Представление объекта методом сеток.

График переходного процесса в точке с координатами  $[i=4, j=5]$  имеет вид:

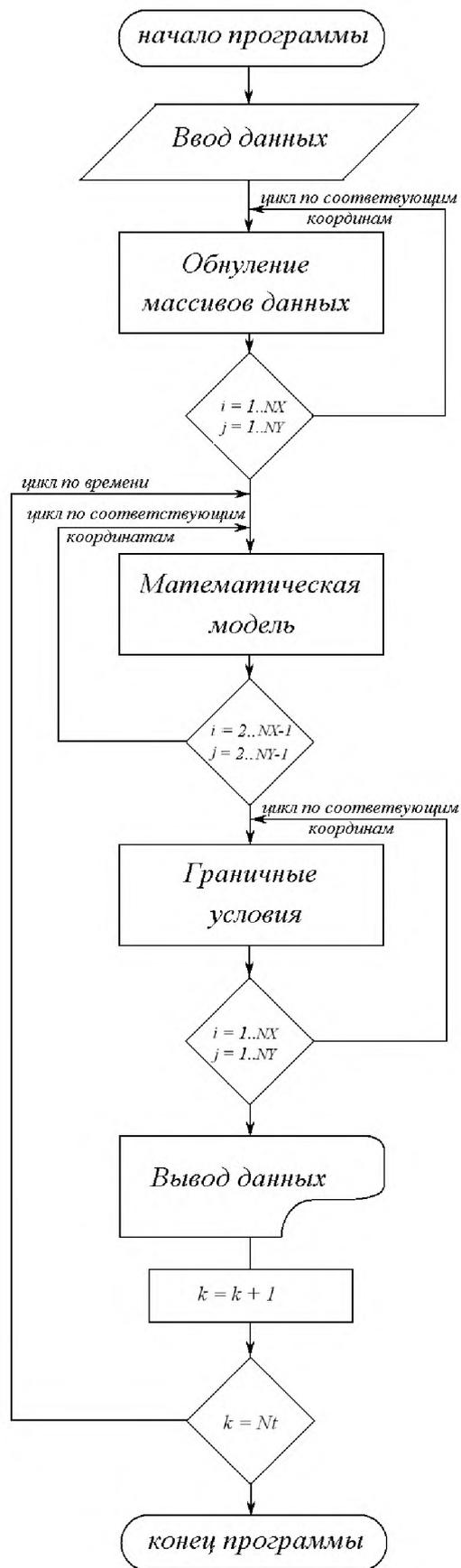


Рис. 3.3. Блок-схема решения дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

В результате моделирования получится трехмерный массив (по  $x$ , по  $y$  и по  $\tau$ ) с

данными.

При этом мы можем построить графики переходных процессов в любой выбранной точке (см. рис. 3.4).

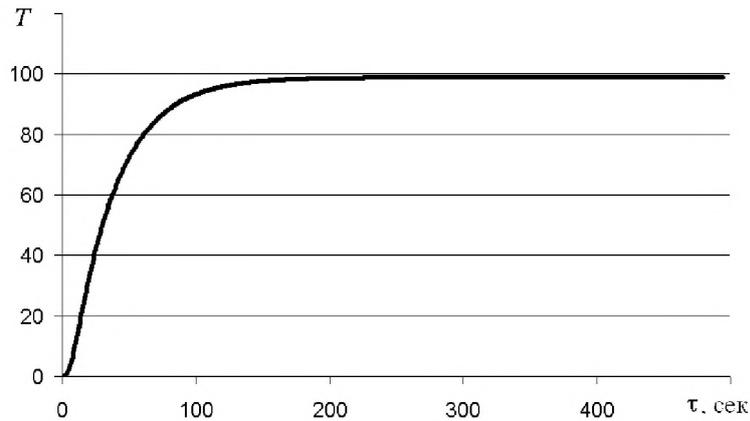
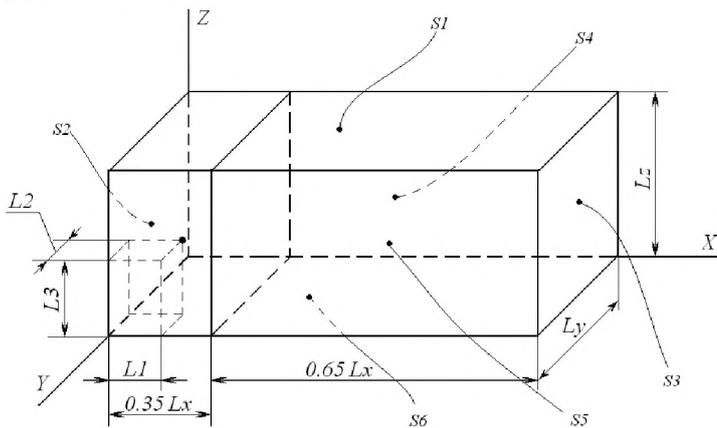


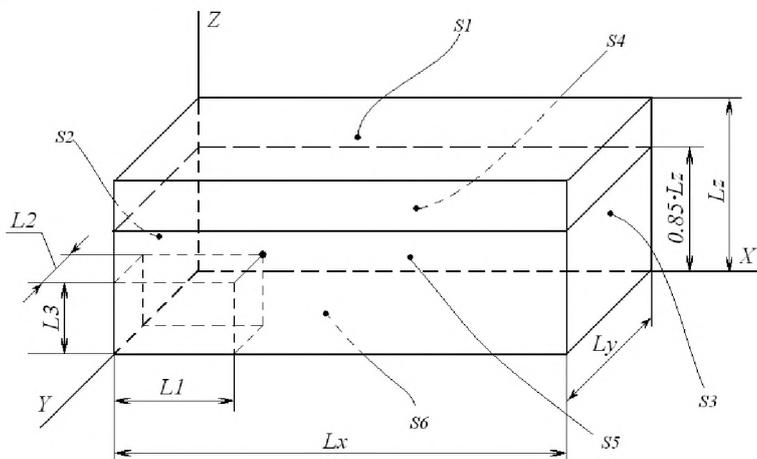
Рис. 3.5. График переходного процесса функции  $T[i=4, j=5, \tau]$ .

### 3.7. Методы моделирования трехмерного распределенного объекта

Представим объект (систему) в виде:  
ДЛЯ ЧЕТНЫХ  $N$



ДЛЯ НЕЧЕТНЫХ  $N$



№	$L_x$ , м.	$L_y$ , м.	$L_z$ , м.	$\partial\tau$ , сек.	L1, м.	L2, м.	L3, м.	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	0.4	0.2	0.1	$\geq 0.1$	0.2 Lx	0.6 Ly	0.1 Lz	q	0	0	0	0	0
2	0.6	0.3	0.2	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.7 Ly	0.2Lz	0	T	0	0	0	1
3	0.8	0.4	0.3	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.1 Ly	0.3Lz	0	0	q	0	1	0
4	1.0	0.14	0.4	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.5 Ly	0.4Lz	0	0	0	T	1	1
5	1.2	0.19	0.14	$\geq 0.01$	0.2 Lx	0.4 Ly	0.5Lz	0	0	0	1	q	0
6	1.3	0.22	0.19	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.5 Ly	0.6Lz	0	0	0	1	0	T
7	1.4	0.25	0.21	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.6 Ly	0.7Lz	q	0	0	1	1	0
8	1.6	0.35	0.28	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.7 Ly	0.1 Lz	0	T	0	1	1	1
9	0.3	0.45	0.18	$\geq 0.01$	0.6 Lx	0.1 Ly	0.2Lz	0	0	q	0	0	0
10	0.5	0.23	0.15	$\geq 0.01$	0.7 Lx	0.2 Ly	0.3Lz	0	0	1	T	0	1
11	0.7	0.34	0.22	$\geq 0.01$	0.1 Lx	0.3 Ly	0.4Lz	0	0	1	0	q	0
12	0.9	0.14	0.25	$\geq 0.01$	0.2 Lx	0.4 Ly	0.1 Lz	0	0	1	0	1	T
13	1.1	0.19	0.35	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.1 Ly	0.2 Lz	q	0	1	1	0	0
14	1.7	0.21	0.45	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.2 Ly	0.3Lz	0	T	1	1	0	1
16	1.1	0.28	0.23	$\geq 0.01$	0.1 Lx	0.3 Ly	0.4Lz	0	0	q	1	1	1
17	1.3	0.18	0.34	$\geq 0.1$	0.2 Lx	0.4 Ly	0.5Lz	0	1	0	T	0	0
18	0.6	0.15	0.14	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.5 Ly	0.1 Lz	0	1	0	0	q	1
19	0.8	0.22	0.19	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.1 Ly	0.2Lz	0	1	0	1	0	T
20	1.0	0.25	0.21	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.2 Ly	0.3Lz	q	1	1	1	0	0
21	1.2	0.35	0.22	$\geq 0.01$	0.1 Lx	0.3 Ly	0.4Lz	0	T	1	1	1	0
22	1.3	0.45	0.25	$\geq 0.01$	0.2 Lx	0.4 Ly	0.5Lz	0	1	q	1	1	1
23	1.4	0.23	0.35	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.5 Ly	0.6Lz	1	0	0	q	0	0
24	1.6	0.34	0.45	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.6 Ly	0.1 Lz	1	0	0	0	T	1
25	0.3	0.21	0.23	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.1 Ly	0.1 Lz	1	0	0	0	1	q
26	0.5	0.28	0.34	$\geq 0.01$	0.6 Lx	0.1 Ly	0.3Lz	T	0	0	0	1	1
27	0.7	0.18	0.14	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.5 Ly	0.4Lz	1	q	0	1	0	0
28	0.9	0.15	0.19	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.1 Ly	0.5Lz	1	0	T	1	0	1
29	1.1	0.22	0.21	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.4 Ly	0.7Lz	1	0	0	q	1	1
30	1.7	0.25	0.22	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.5 Ly	0.1 Lz	1	0	1	0	T	0
31	1.6	0.35	0.25	$\geq 0.01$	0.3 Lx	0.6 Ly	0.2Lz	1	0	1	0	0	q
32	0.3	0.45	0.35	$\geq 0.01$	0.4 Lx	0.1 Ly	0.3Lz	T	0	1	0	1	0
33	0.5	0.25	0.18	$\geq 0.01$	0.5 Lx	0.2 Ly	0.4Lz	1	q	1	0	1	1

Уравнения, описывающие процессы, протекающие в объекте, имеют вид:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a1 \cdot \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right),$$

Диапазоны изменения переменных  $x, y, z$  указываются в соответствии с исходными данными,  $\tau > 0$ .

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a2 \cdot \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - g(y) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x},$$

Диапазоны изменения переменных  $x, y, z$  указываются в соответствии с исходными данными,  $\tau > 0$ .

**коэффициенты теплопроводности  $\lambda_1, \lambda_2$  сред** принять равными:

401 (медь) и 0.561 (вода), соответственно, для четных номеров вариантов;  
 3.0 мрамор и 0.0075 (воздух), соответственно, для нечетных номеров вариантов.

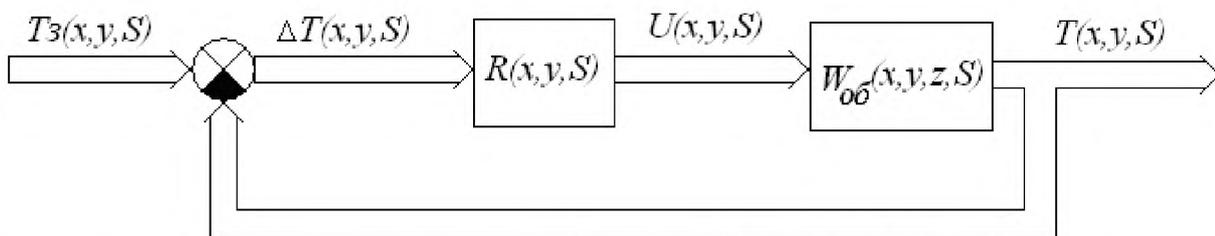
Коэффициенты температуропроводности  $a \left[ \frac{m^2}{сек} \right]$  сред определяются по формуле  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ ,

где  $\gamma \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$  - плотность,  $\lambda \left[ \frac{Вт}{м \cdot град} \right]$  - коэффициент теплопроводности,  $c \left[ \frac{дж}{кг \cdot град} \right]$  - коэффициент теплоемкости.

Плотность и коэффициенты теплоемкости сред определяется из таблицы:

СРЕДА	ПЛОТНОСТЬ ( $\gamma$ )	КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОЕМКОСТИ (с)
ВОДА	915	1.429
МЕДЬ	8960	373.3
ВОЗДУХ	1.32	960
МРАМОР	2700	0.92

Замкнутую распределенную систему автоматического управления можно представить в виде:



Где  $T_3(x, y, S)$  - задающее воздействие;  $\Delta T(x, y, S) = T_3(x, y, S) - T(x, y, S)$  - рассогласование;  $U(x, y, S)$  - управляющее воздействие;  $T(x, y, S)$  - функция выхода;  $R(x, y, S)$  - передаточная функция регулятора;  $W_{об}(x, y, z, S)$  - передаточная функция объекта.

Представим передаточную функцию регулятора в виде пространственно-усилительного звена

$$R(x, y, S) = E_1 \cdot (C1 - C2 \cdot \nabla^2), \text{ где } C1 = \frac{n_1 - 1}{n_1}, \quad C2 = \frac{1}{n_1}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (\text{в декартовой}$$

системе координат).

Отсюда, получим

$$U(x, y, S) = \Delta T(x, y, S) \cdot E_1 \cdot C1 - E_1 \cdot C2 \cdot (\nabla^2 \Delta T(x, y, S))$$

Преобразуем

$$U(x, y, S) = \Delta T(x, y, S) \cdot E_1 \cdot C1 - E_1 \cdot C2 \cdot \left( \frac{\partial^2 \Delta T(x, y, S)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T(x, y, S)}{\partial y^2} \right)$$

Далее, полученную функцию преобразуем в дискретную форму записи и подставляем в численную модель.

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

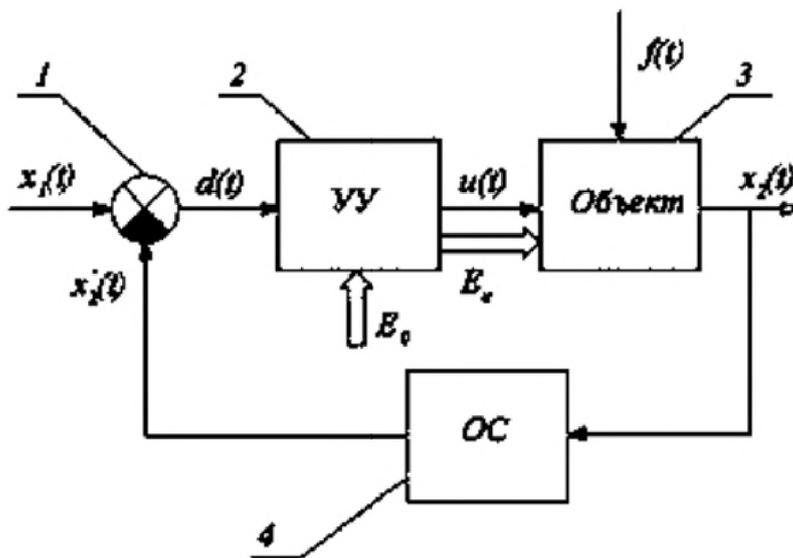
1. Титульный лист с названием и номером лабораторной работы, а также фамилией и инициалами студента выполнившего работу;
2. Цель и задание на работу;

3. Листинг программы (в оболочках: MathCad, MathLab, Maple или языках программирования: C++, Pascal, Delphi, C++ Builder и др.) осуществляющей решение численной модели замкнутой системы управления распределенным объектом;
4. Графики переходных процессов замкнутой системы автоматического управления.

### 3.8. Методы моделирования замкнутой системы управления с пространственно-усилительным звеном (практическая работа)

Законы управления

Рассмотрим контур управления приведенный на рисунке:



описанному системой уравнений (1).

Каждый из элементов данного контура имеет четкое назначение. Так при создании системы управления объект считается заданной неизменной частью системы. Конечно, в практике проектирования имеется множество случаев, когда свойства объекта также можно корректировать в соответствии с требованиями других элементов контура. В дальнейшем будем считать, что свойства объекта заданы и неизменны. Функции обратной связи и элемента сравнения в контуре управления также определены. Таким образом, оставшийся элемент данного контура, устройство управления, является тем блоком, который на основе текущей ошибки  $\Delta$  вырабатывает требуемое текущее управление  $u$ . В теории управления принято данный блок характеризовать законом управления.

Различают линейные и нелинейные законы управления. Как и системы управления в целом, так и законы управления бывают непрерывные и дискретные.

Рассмотрим линейные непрерывные законы управления. Отметим, что выбор того или другого закона управления для данного объекта и является одной из основных задач решаемых при разработке системы управления объектом, поэтому здесь приводится только их основные свойства, а не их подбор.

Наиболее простым законом управления является закон пропорционального управления, который описывается следующей зависимостью:

$$u = k \cdot \Delta; \quad (2)$$

Теперь рассмотрим, что будет происходить в замкнутом контуре, представленном на рис. 1 при пропорциональном управлении. Так как в системах управления главная связь, как правило, отрицательная, то с учетом первого уравнения в системе (1) можно заключить, что при пропорциональном управлении сигнал управления  $u$  будет равен нулю только при отсутствии ошибки. Когда на систему будет действовать внешнее возмущение,

то при неизменном входном сигнале  $x_1$ , сигнал на выходе  $x$  неизбежно изменится из-за влияния нагрузки  $f$ . Следовательно, при пропорциональном управлении наличие внешнего возмущения будет автоматически приводить к возникновению даже в установившемся режиме к ошибке  $\Delta$ . Единственным способом, уменьшить возникающую ошибку при наличии возмущения  $f$ , является увеличение коэффициента усиления  $k$ .

Это одно из основных свойств систем с пропорциональным управлением. Часто устройство управления, реализующее пропорциональный закон управления называют  $P$  – регулятором.

Следующим, распространенным законом управления является закон интегрального управления. Управляющий сигнал  $u$  в этом случае равен интегралу по времени от текущей ошибки

$$u = k \cdot \int_0^t \Delta \cdot dt \quad (3)$$

Пусть в текущий момент времени в рассматриваемом контуре с интегральным законом управления и равной нулю текущей ошибкой возникла нагрузка  $f$ . Тогда в последующий момент времени выходная величина  $x_2$ , при неизменном входном сигнале  $x_1$ , изменится и возникнет ошибка  $\Delta$ . Приняв за начало отсчета, момент возникновения ошибки констатируем, что управляющее воздействие  $u$  пока остается неизменным. С течением времени интеграл в выражении (3), даже при неизменной ошибке начинает увеличиваться, что приводит к увеличению самого сигнала управления  $u$ . Заметим, что физическая реализация управляющего устройства с интегральным законом управления по (3), как бы априори «предполагает» его блочное исполнение: сначала маломощный информационный блок интегрирования ошибки и только потом усиление этой промежуточной величины по мощности, и окончательное формирование управления  $u$ . Так как сигнал управления возрос, и он производит на объект в данный момент времени такое воздействие, что ошибка должна уменьшаться, то, соответственно, уменьшается темп изменения управляющего сигнала  $u$ . С течением времени под действием управляющего сигнала ошибка становится равной нулю. На объект по-прежнему действует ранее возникшее возмущение  $f$ , но теперь на вход объекта поступает некоторое управляющее воздействие  $u$ , компенсирующее данное возмущение и сохраняя на выходе сигнал  $x_2$ , равный заданному входному сигналу  $x_1$ . Таким образом, интегральный закон управления в отличие от пропорционального управления позволяет уменьшить ошибку, возникающую между входной величиной и выходом при наличии постоянно меняющейся нагрузки. Управляющее устройство, реализующее этот закон, в технической литературе по управлению часто называют  $I$  – регулятором. Если пропорциональное управления действует по принципу: большая ошибка – большее управление для уменьшения ошибки, то интегральный закон работает по принципу: тем больше «накопилось» ошибки с течением времени, таково и будет текущее воздействие, уменьшающее текущую ошибку. Интегральное управление «помнит» предысторию процесса, и слабо реагирует на текущие изменения возмущения  $f$  или входного воздействия  $x_1$ .

В отличие от пропорционального и интегрального законов управления дифференциальный закон управления характеризуется тем, что управление на объект пропорционально не самой величине ошибки, а – производной от ошибки. В этом случае, как и для интегрального закона, управляющее устройство априори предполагается состоящим из двух последовательно соединенных блоков: блока дифференцирования по времени текущей ошибки  $\Delta$ , и блока усиления вычисленной производной по мощности и формирования управления  $u$ . Функциональную связь между ошибкой  $\Delta$  и управлением  $u$  для дифференциального закона управления можно записать:

$$u = k \cdot \frac{d\Delta}{dt} \quad (4)$$

Проведем анализ поведения замкнутого контура управления (рис.1) при применении данного закона управления. Пусть в некоторый момент времени текущая ошибка в данном контуре равна нулю и на входе системы сигнал  $x_1$  скачкообразно, с крутым фронтом изменился на незначительную величину. При этом, если нагрузка  $f$  не изменилась, то в случае интегрального управления объект отреагировал на данное незначительное изменение ошибки только через некоторый промежуток времени, пока не «накопился» определенный уровень управляющего сигнала т.е. по прошествии определенного промежутка времени. А в случае такого же малого мгновенного изменения входного сигнала в системе с пропорциональным законом управления объект бы также получил малое управляющее воздействие. Заметим, что при пропорциональном законе управления всегда управления пропорционально ошибке, а, следовательно, если для рассматриваемого случая входной сигнал бы медленно изменялся на эту малую величину, то сигнал управления не был бы большим, чем при быстром изменении входного сигнала на эту малую величину. Для дифференциального закона управляющее воздействие при быстром изменении входного сигнала на малую величину и при медленном будут существенно отличаться, управляющий сигнал при данном способе его формирования пропорционален скорости изменения ошибки, что позволяет сформировать упреждающее управление на объект. В этом основное отличие дифференциального закона от выше перечисленных законов. Конечно, в дальнейшем мы подчеркнем основные недостатки чисто дифференциального закона, связанного с тем, что управление зависит от скорости изменения ошибки. Но уже сейчас можно подчеркнуть, что если сам входной сигнал меняется по времени медленно и одновременно в нем присутствует некоторая малая быстро меняющаяся помеха, то управление объектом с использованием дифференциального закона проблематично. Управляющее устройство, реализующее управление по производной часто называют D – регулятором.

Эти три основных линейных закона управления можно с помощью линейных математических операций комбинировать различным образом. Часто в практике регулирования встречаются следующие комбинации из названных линейных законов:

- PI – регуляторы - 
$$u = k_1 \cdot \Delta + k_2 \int_0^t \Delta \cdot dt ;$$
- PD – регуляторы - 
$$u = k_1 \cdot \Delta + k_2 \frac{d\Delta}{dt} ;$$
- ID – регуляторы - 
$$u = k_1 \cdot \int_0^t \Delta \cdot dt + k_2 \frac{d\Delta}{dt} ;$$
- PID – регуляторы - 
$$u = k_1 \cdot \Delta + k_2 \int_0^t \Delta \cdot dt + k_3 \cdot \frac{d\Delta}{dt} ;$$

Это основные комбинированные линейные законы управления.

### 3.9. Методы моделирования замкнутой распределенной системы управления с распределенным высокоточным регулятором

В качестве входного воздействия выступает функция  $U_j(\tau)$ , связь которой с функцией изменения уровня жидкости в пласте  $S(x_j, \tau)$  представлена соотношением:

$$S(x_j, \tau) = 0.001 \cdot U_j,$$

где  $S(x_j, \tau)$  – понижение напора, спровоцированного возмущающим воздействием, поданным в j-ой добывающей скважине при  $j = 1, 2 \dots 4$ .

Для определения реакции объекта на заданную пространственную гармонику входного воздействия, в установившемся режиме напорov подается скачковое возмущающее воздействие в виде заданной пространственной гармоники. Так как граничными условиями на границах моделируемого сегмента месторождения заданы поддерживаемые значения понижений напорov, равные их установившемуся значению, то воздействие от эксплуатационных скважин может быть принято равным 0.

Функция входного воздействия на объект управления описана следующим выражением:

$$S_i = S_i(t) \cdot \delta(x_i = x^*, y_i, z_i) = C_j \cdot \sin(\psi_j \cdot x_i) \cdot e(j\omega t),$$

где  $X^*$  - точка входного воздействия, в которой  $\delta$ -функция равна 1;

$C_j$  - заданные числа ( $j = \overline{1, \infty}$ );

$\omega$  - угловая частота;

$\psi_i = \frac{\pi \cdot i}{L_x}$  - пространственная частота.

В качестве инструмента проведения численного эксперимента была разработана программа для ЭВМ, позволяющая получить наглядные данные о характере протекания гидродинамических процессов в моделируемом объекте. Так как для предложенного объекта было определено свойство пространственной инвариантности, для определения динамики объекта достаточно результатов моделирования, полученных в любой из скважин. Для дальнейших расчетов были взяты результаты моделирования по первой скважине.

Переходной процесс, описывающий реакцию моделируемого объекта на I гармонику ряда входного воздействия, представлен на рисунке 3.1. Реакция получена в точке расположения первой контрольной скважины.

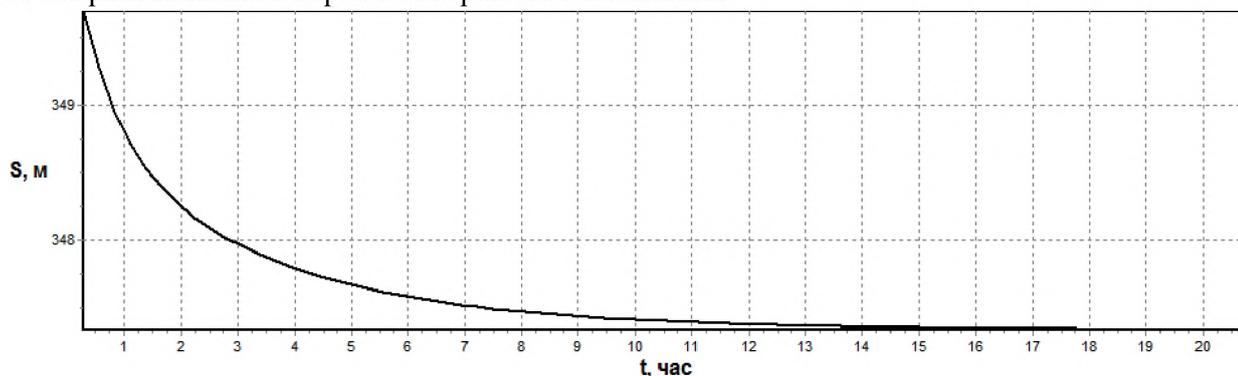


Рисунок 3.1 – Переходной процесс по I гармонике ряда

Переходной процесс, описывающий реакцию моделируемого объекта на I гармонику ряда входного воздействия, полученный в точке расположения I контрольной скважины, представлен на рисунке 3.2.

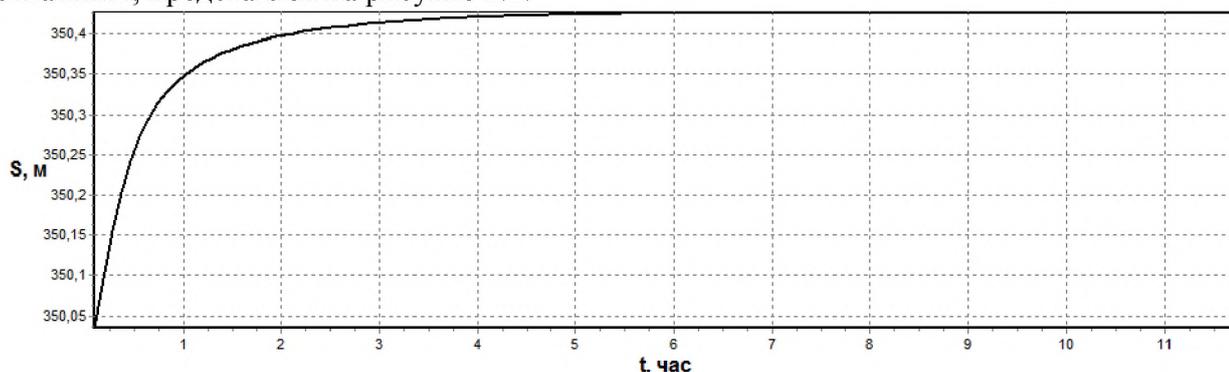


Рисунок 3.2 – Переходной процесс по IV гармонике ряда

С использованием результатов моделирования могут быть найдены параметры передаточной функции объекта  $K$ ,  $T$ ,  $\tau$ . Передаточная функция объекта задана как аperiodическое звено с чистым запаздыванием и записана в виде:

$$W(G, s) = \frac{k(G)}{T(G)s + 1} \cdot e^{-p\tau(G)}$$

где  $k(G) = \frac{T_{ycm}}{T_{ex}}$  - коэффициент усиления;

$\tau(G)$  – время запаздывания системы, с;

$T(G)$  – постоянная времени, с;

$p$  - оператор Лапласа;

$G$  – обобщённая координата.

Характеристики  $K$ ,  $T$ ,  $\tau$  могут быть определены численными методами и посредством графоаналитического анализа. Результаты графоаналитического анализа переходного процесса по I гармонике входного воздействия представлены на рисунке 3.3.

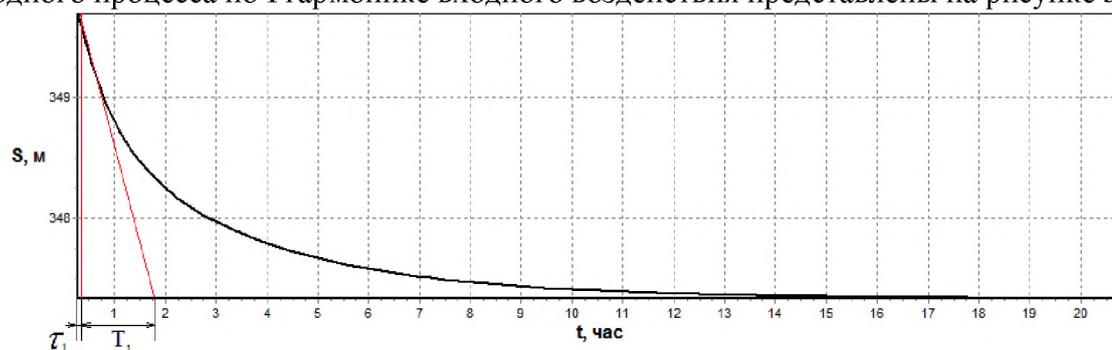


Рисунок 3.3 – Графоаналитический анализ результата моделирования по I гармонике входного воздействия

Результат графоаналитического анализа по IV гармонике входного воздействия представлен на рисунке 3.4.

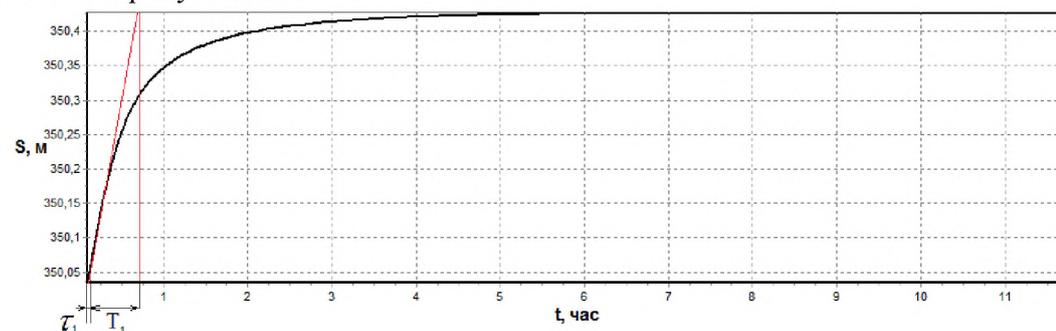


Рисунок 3.4 – Графоаналитический анализ результата моделирования по IV гармонике входного воздействия

В результате анализа были получены численные значения коэффициентов передаточной функции:

$$K_1 = 3,836; \quad T_1 = 172250; \quad \tau_1 = 8100; \quad G_1 = 0,0002191024;$$

$$K_4 = 1,152; \quad T_4 = 120131; \quad \tau_4 = 5012; \quad G_4 = 0,003505536.$$

Установив наличие свойства фильтрации пространственных гармоник у объекта управления, предлагается перейти к синтезу распределенного высокоточного регулятора.

В результате вычислений были получены графики частотных характеристик объекта управления для четырех пространственных мод. С помощью полученных переходных процессов и определения частотных характеристик объекта предлагается определить параметры РВР, реализующего пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления [18].

Требования, предъявляемые регулятору, определены как:

- запас устойчивости по модулю  $\Delta L \geq 5$  дБ;
- запас устойчивости по фазе  $\Delta \varphi \geq \pi/6$ ;
- значение параметра  $\Delta G_1 = 100$ .

Предложенный вид передаточной функции РВР состоит из распределенных звеньев, а его передаточная функция имеет вид:

$$W(x, s) = E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \cdot \nabla^2 \right) + E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \cdot \nabla^2 \right) \cdot s + \\ + E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \cdot \nabla^2 \right) \cdot \frac{1}{s},$$

где  $E_1, E_2, E_4$  - общие коэффициенты усиления пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего звеньев соответственно;

$n_1, n_2, n_4$  - весовые коэффициенты ( $n_i \geq 1, i=1,2,4$ ),

$\nabla^2$  - лапласиан [2].

С использованием обобщенной координаты  $G$  выражение 3.18 может быть преобразовано к виду:

$$W(x, G) = E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G \right) + E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_2} \cdot G \right) \cdot \frac{1}{s} + \\ + E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} \cdot G \right) \cdot s. \\ 0 \leq G \leq \infty.$$

Далее необходимо определить частоты пересечения линии  $\varphi = -\pi + \Delta\varphi$  графиков логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики (ЛАФЧХ), которые также называются частотами среза. После определения значений коэффициента усиления ( $K_{об}$ ) на частотах среза, они откладываются в логарифмическом масштабе на отдельном графике  $K_{об}(G)$ , что позволяет получить график зависимости коэффициента усиления  $K_{об}$  от обобщенной координаты  $G$  [90].

Посредством решения следующей системы уравнений определяются значения параметров  $E_1$  и  $n_1$ :

$$\begin{cases} K_p(G_1) = E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G_1 \right); \\ K_p(G_4) = E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G_4 \right); \end{cases}$$

где  $K_p(G_1), K_p(G_4)$  - коэффициенты усиления;

$i$  - номер моды пространственной координаты  $G_i$ .

Значения  $n_1$  определяется отношением первого уравнения ко второму, в результате которого формируется выражение 3.21, имеющее следующий вид:

$$\frac{K_p(G_1)}{K_p(G_4)} = \frac{E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G_1 \right)}{E_1 \cdot \left( \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G_4 \right)}.$$

Подставив значения  $G_1, G_4$  значение  $n_1 = 1,00133$ .

Далее, преобразуем систему уравнений (3.20) к следующему виду:

$$\begin{cases} K_p(G_1) \cdot n_1 = E_1 \cdot n_1 - E_1 + E_1 \cdot G_1, \\ K_p(G_4) \cdot n_1 = E_1 \cdot n_1 - E_1 + E_1 \cdot G_4. \end{cases}$$

Отношением первого и второго уравнений позволяет получить равенство для определения параметра  $E_1$ :

$$(K_p(G_1) - K_p(G_4)) \cdot n_1 = E_1 \cdot (G_1 - G_4).$$

Отсюда:

$$E_1 = \frac{(K_p(G_1) - K_p(G_4)) \cdot n_1}{G_1 - G_4}.$$

Подставив численные значения, найдено значение  $E_1 = 21,645148$ .

Чтобы определить параметры  $E_2, E_4, n_2, n_4$  необходимо произвести решение следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \lg(\omega(G_1)) = 0,5 \cdot \lg \left( E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1 + G_1}{n_4} \right) \right) - 0,5 \cdot \lg \left( E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2} \right) \right), \\ \lg(\omega(G_4)) = 0,5 \cdot \lg \left( E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1 + G_4}{n_4} \right) \right) - 0,5 \cdot \lg \left( E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1 + G_4}{n_2} \right) \right). \end{cases}$$

Вычитая первое уравнение из второго, получено выражение следующего вида:

$$\lg(\Delta\omega^2) = \lg \left( \frac{n_4 - 1 + G_4}{n_4 - 1 + G_1} \right) - \lg \left( \frac{n_2 - 1 + G_4}{n_2 - 1 + G_1} \right).$$

Далее, определив частоты среза модуля из соотношения,  $\Delta\omega^2$  может быть записана в следующем виде:

$$\Delta\omega^2 = \left( \frac{\omega(G_4)}{\omega(G_1)} \right)^2.$$

Так как  $\Delta\omega^2 > 0$ , то  $n_2 \rightarrow \infty$ , что позволяет, подставив  $n_2$  в уравнение, получить значение  $n_4 = 1,003841$ .

Предлагается ввести параметр  $\Delta(G_1)$ , который предназначен для компенсации параметрических возмущений, действующих на объект управления. Под параметрическим возмущением понимается неизвестная величина из некоторого ограниченного множества,

в результате действия которой происходит медленное изменение параметров объекта управления. Представленная компенсация достигается путем расширения области возле частоты среза модуля разомкнутой системы, в которой фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю:

$$\lg(\omega(G_1)) = 0,5 \cdot \lg(K_4(G_1)) - 0,5 \cdot \lg(K_2(G_1)).$$

Графическое представление  $\Delta(G_1)$  показано на рисунке 3.5.

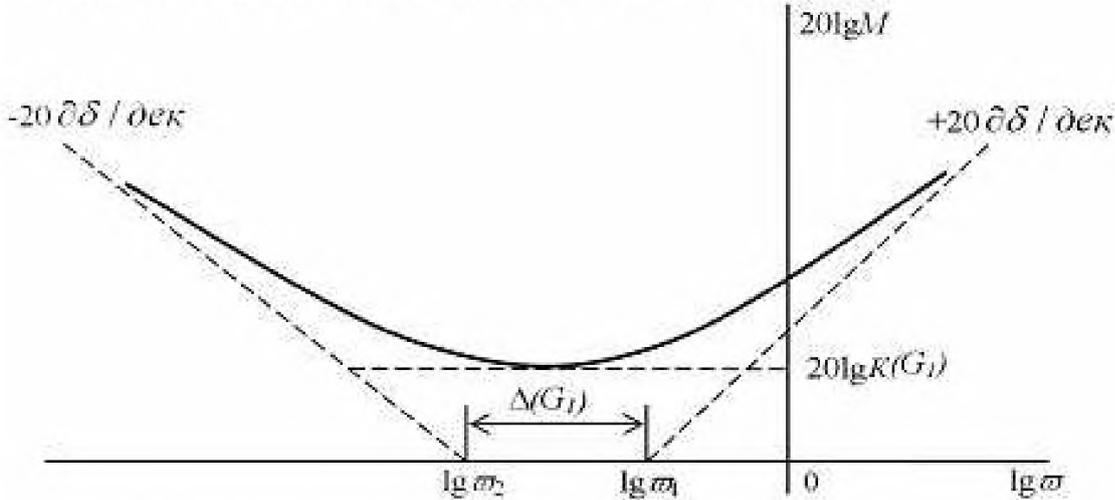


Рисунок 3.5 – Представление общего вида ЛАЧХ для ПИД-регулятора по I гармонике ряда входного воздействия

Уравнения, описывающие связь функциональных зависимостей  $K_2(G_1)$  и  $K_4(G_1)$  с параметром  $\Delta(G_1)$  представлены в следующем виде:

$$\Delta G_1 = \lg \varpi_1 - \lg \varpi_2,$$

$$\lg \varpi_1 = \lg \left( \frac{1}{K_2(G_1)} \right); \quad \lg \varpi_2 = \lg(K_4(G_1));$$

$$\Delta G_1 = \lg \left( \frac{1}{K_2(G_1)} \right) - \lg(K_4(G_1)).$$

Заданное значение  $\Delta G_1 = 100$ . Для нахождения  $E_2$  и  $E_4$  необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \lg(\omega(G_1)) = 0,5 \cdot \lg \left( E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1 + G_1}{n_4} \right) \right) - 0,5 \cdot \lg \left( E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2} \right) \right), \\ \Delta G_1 = \lg \left( \frac{1}{E_2 \cdot \left( \frac{n_2 - 1 + G_1}{n_2} \right)} \right) - \lg \left( E_4 \cdot \left( \frac{n_4 - 1 + G_1}{n_4} \right) \right). \end{cases}$$

Подставив численные значения известных параметров, были определены значения  $E_2 = 13,451708$ ,  $E_4 = 0,001838$ .

После определения всех параметров передаточной функции РВР предлагается перейти к моделированию распределенной системы уравнения, реализующей принцип замкнутого управления.

## МОДУЛЬ 4. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### 4.1. Обзор инструментов разработки систем управления технологическими процессами

(лекция)

Это направление существенно развилось в последнее время, что объясняется, в первую очередь, следующими причинами:

- Повышением надежности РС;
- Наличием множества модификаций персональных компьютеров в обычном и промышленном исполнении;
- Использовании открытой архитектуры;
- Легкости подключения любых блоков ввода/вывода (модулей ус), выпускаемых третьими фирмами;
- Возможностью использования широкой номенклатуры наработанного программного обеспечения (операционных систем реального времени, баз данных, пакетов прикладных программ контроля и управления).

Контроллеры на базе рс, как правило, используют для управления небольшими замкнутыми объектами в промышленности, в специализированных системах автоматизации в медицине, научных лабораториях, средствах коммуникации. Общее число входов/выходов такого контроллера обычно не превосходит нескольких десятков, а набор функций предусматривает сложную обработку измерительной информации с расчетом нескольких управляющих воздействий. Рациональную область применения контроллеров на базе рс можно очертить следующими условиями:

- Выполняется большой объем вычислений за достаточно малый интервал времени при небольшом количестве входов и выходов объекта и управления (необходима большая вычислительная мощность);
- Средства автоматизации работают в окружающей среде, не слишком отличающейся от условий работы офисных персональных компьютеров;

На рынке контроллеров на базе рс в России успешно работают компании: octagon, advantech, analogdevices и др. Многие российские фирмы закупают компьютерные платы и модули ввода/вывода этих фирм и строят из них контроллеры.

Локальный программируемый контроллер (plc)

В настоящее время в промышленности используется несколько типов локальных контроллеров.

А) встраиваемый в оборудование и являющийся его неотъемлемой частью. Такой контроллер может управлять станком с чпу, современным интеллектуальным аналитическим прибором, автомашинистом и другим оборудованием. Выпускается на раме без специального кожуха, поскольку монтируется в общий корпус оборудования.

Б) автономный, реализующий функции контроля и управления небольшим достаточно изолированным технологическим объектом, как, например, районные котельные, электрические подстанции. Автономные контроллеры помещаются в защитные корпуса, рассчитанные на разные условия окружающей среды. Почти всегда эти контроллеры имеют порты для соединения в режиме «точка-точка» с другой аппаратурой и интерфейсы, которые могут через сеть связывать их с другими средствами автоматизации. В контроллер встраивается или подключается к нему специальная панель интерфейса с оператором, состоящая из алфавитно-цифрового дисплея и набора функциональных клавиш.

Контроллеры данного класса, как правило, имеют небольшую или среднюю вычислительную мощность.

Локальные контроллеры чаще всего имеют десятки входов/выходов от датчиков и исполнительных механизмов, но существуют модели контроллеров, поддерживающие свыше сотни входов/выходов.

Контроллеры реализуют простейшие типовые функции обработки измерительной информации, блокировок, регулирования и программно-логического управления. Многие из них имеют один или несколько физических портов для передачи информации на другие системы автоматизации.

В этом классе следует выделить специальный тип локальных контроллеров, предназначенных для систем противоаварийной защиты. Они отличаются особенно высокой надежностью, живучестью и быстродействием. В них предусматриваются различные варианты полной текущей диагностики неисправностей с локализацией их до отдельной платы, резервирование как отдельных компонентов, так и всего устройства в целом.

Сетевой комплекс контроллеров (plc, network).

Сетевые ПТК наиболее широко применяются для управления производственными процессами во всех отраслях промышленности. Минимальный состав данного класса ПТК подразумевает наличие следующих компонентов:

- Набор контроллеров;
- Несколько дисплейных рабочих станций операторов;
- Системную (промышленную) сеть соединяющую контроллеры между собою и контроллеры с рабочими станциями.

Контроллеры каждого сетевого комплекса, как правило, имеют ряд модификаций, отличающихся друг от друга быстродействием, объемом памяти, возможностями по резервированию, способностью работать в разных условиях окружающей среды, числом каналов ввода/вывода. Это облегчает использование сетевого комплекса для разнообразных технологических объектов, поскольку позволяет наиболее точно подобрать контроллеры под отдельные элементы автоматизируемого объекта и разные функции контроля и управления. В качестве дисплейных рабочих станций (пультов оператора) почти всегда используются персональные компьютеры в обычном или промышленном исполнении, большей частью с двумя типами клавиатур (традиционной алфавитно-цифровой и специальной функциональной), и оснащенные одним или несколькими мониторами, имеющими большой экран. Промышленная сеть может иметь различную структуру: шину, кольцо, звезду; она часто подразделяется на сегменты, связанные между собой повторителями и маршрутизаторами. К передаче сообщений предъявляются жесткие требования: они гарантированно должны доставляться адресату, а для сообщений высшего приоритета, например, предупреждающих об авариях, также следует обеспечить указанный срок передачи сообщений. В этом классе птк выделяют телемеханический тип сетевого комплекса контроллеров, предназначенный для автоматизации объектов, распределенных на большой области пространства. Промышленная сеть с характерной структурой и особые физические каналы связи (радиоканалы, выделенные телефонные линии, оптоволоконные кабели) позволяют интегрировать узлы объекта, отстоящие друг от друга на многие десятки километров, в единую систему автоматизации. Рассматриваемый класс сетевых комплексов контроллеров имеет верхние ограничения как по сложности выполняемых функций (измерения, контроля, учета, регулирования и блокировки), так и по объему автоматизируемого объекта (в пределах тысяч измеряемых и контролируемых величин). Чаще всего сетевые комплексы применяются на уровне цехов машиностроительных заводов, агрегатов нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, а также цехов предприятий пищевой промышленности. Телемеханические сетевые комплексы контроллеров используются для управления газо- и нефтепроводами, электрическими сетями, транспортными системами.

#### 4. Распределенные маломасштабные системы управления (dcs, smallscale).

Этот класс микропроцессорных ПТК превосходит большинство сетевых комплексов контроллеров по мощности и сложности выполняемых функций. В целом, этот класс еще имеет ряд ограничений по объему автоматизируемого производства (порядка десятка тысяч контролируемых параметров) и набору реализуемых функций. Основные отличия от предшествующего класса заключаются в несколько большем разнообразии модификаций контроллеров, блоков ввода/вывода, большей мощности центральных процессоров, более развитой и гибкой сетевой структуре. Как правило, ПТК этого класса имеет развитую многоуровневую сетевую структуру. Так нижний уровень может выполнять связь контроллеров и рабочей станции компактно расположенного технологического узла, а верхний уровень поддерживать взаимодействие нескольких узлов друг с другом и с рабочей станцией диспетчера всего автоматизируемого участка производства. На верхнем уровне (уровне рабочих станций операторов) эти комплексы, по большей части, имеют достаточно развитую информационную сеть. В некоторых случаях расширение сетевой структуры идет в направлении применения стандартных цифровых полевых сетей, соединяющих отдельные контроллеры с удаленными от них блоками ввода/вывода и интеллектуальными приборами. Подобная простая и дешевая сеть соединяет по одной витой паре проводов контроллер с множеством интеллектуальных полевых приборов, что резко сокращает длину кабельных сетей на предприятии и уменьшает влияние возможных помех, поскольку исключается передача низковольтной аналоговой информации на значительные расстояния. Мощность контроллеров, применяемых в этом классе средств, позволяет в дополнение к типовым функциям контроля и управления реализовывать более сложные и объемные алгоритмы управления (например, самонастройку алгоритмов регулирования, адаптивное управление). Маломасштабные распределенные системы управления используются для автоматизации отдельных средних и крупных технологических объектов предприятий непрерывных отраслей промышленности, а также цехов и участков дискретных производств и цехов заводов черной и цветной металлургии.

#### 5. Полномасштабные распределенные системы управления (dcs, fullscale).

Это наиболее мощный по возможностям и охвату производства класс контроллерных средств, практически не имеющий границ ни по выполняемым на производстве функциям, ни по объему автоматизируемого производственного объекта. Одна такая система может использоваться для автоматизации производственной деятельности целого крупномасштабного предприятия.

### **4.2. Промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры** (лекция)

АСУ ТП –автоматизированная система управления технологическим процессом, представляющая человеко-машинную систему, предназначенную для выработки и реализации управления технологическим объектом управления в соответствии с некоторым принятым критерием.

Технологический объект управления (ТОУ)– это совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по регламенту процесса производства. В качестве технологического объекта управления могут рассматриваться: отдельные установки и агрегаты; группы станков, выполняющих набор последовательных операций и образующих единую технологическую линию; отдельные производственные структуры (участок, цех), выполняющие самостоятельные технологические процессы и некоторый процесс производства в целом. В зависимости от решаемых задач АСУ ТП может иметь различную структуру; выделяют 3 класса АСУ ТП: локальные, централизованные и распределенные системы управления.

Локальная система управления используется для управления технологически независимым объектом с компактно расположенным оборудованием, и несложными задачами управления. Примеры локальных систем: системы стабилизации, следящие, программного управления. Основные элементы локальной системы: ТОЭ, датчики, исполнительное устройство и локальный регулятор. В системе обычно предусматриваются элементы ручного управления и связи с оператором. Рис.1.1.

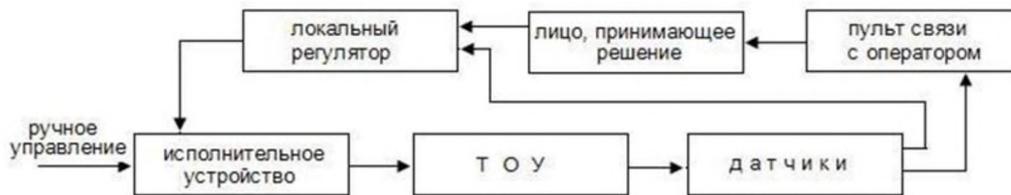


Рис.1.1. Типовая структура локальной системы управления.

В зависимости от реализации регулятора локальные системы могут быть как аналоговыми, так и цифровыми.

Централизованная система управления используется для управления сосредоточенным объектом со сложными или разнообразными функциями управления или большим количеством сигналов «вход-выход». В системе есть два уровня: на нижнем уровне находятся объекты управления с датчиками и исполнительными устройствами на верхнем управляющая вычислительная машина (УВМ) и устройство сопряжения с объектом (УСО). УСО преобразует различные по виду сигналы от датчиков (входные сигналы), в цифровой код в формате, определяемом конкретной УВМ. Сформированные УВМ в виде цифрового кода сигналы управляющих воздействий для исполнительных устройств (выходные сигналы) УСО преобразует к одному из стандартных видов. Для контроля над процессом предусмотрен пульт связи с оператором. Все процессы обработки сигналов датчиков и формирование управляющих сигналов для всех контуров управления последовательно исполняет одна и та же УВМ. Она также обеспечивает интерфейс с оператором.

Централизованная система имеет два основных недостатка: малая надежность и низкое быстродействие. Система становится неработоспособной при отказе УВМ или УСО. При большом количестве датчиков и контуров управления существенно увеличивается время основного цикла управляющей программы УВМ. Для устранения этих недостатков применяют следующие решения.

1. Для повышения надежности осуществляется: а) Дублирование основных элементов системы управления: УВМ и УСО; б) Применение супервизорной структуры.
2. Для повышения быстродействия передают часть функций управления на более низкий уровень: а) Применение супервизорной структуры. б) Переход к распределенной многоуровневой системе управления. Рис.1.2.

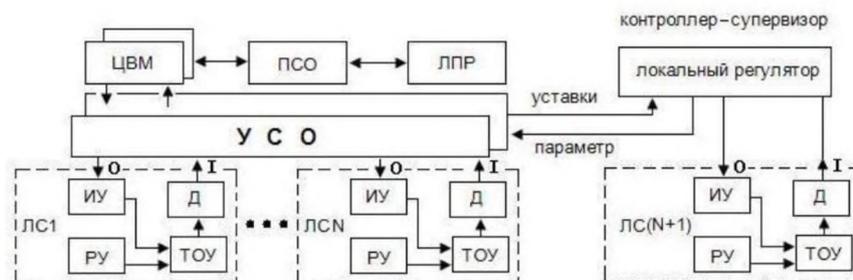


Рис.1.2. Типовая структура централизованной системы управления.

В супервизорной структуре с верхнего уровня на нижний передаются в цифровом виде значения установок для регулятора и команды для локального контроллера, а с нижнего уровня на верхний параметры объекта, также в цифровом виде. Непосредственное управление в контуре выполняет локальный контроллер.

Современная модель автоматизации промышленного предприятия

Распределенная система управления (PCY) содержит несколько уровней. Модель АСУП предполагает, что САУ различного уровня интегрированы в единую систему, охватывающую весь процесс жизнедеятельности предприятия. Модель имеет форму пирамиды. Опишем ее, начиная с основания. Иерархическая структура и типовая схема многоуровневой PCY приведена ниже на рис 4.3 и 4.4.

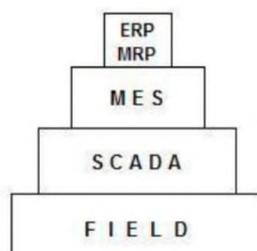


Рис. 4.3. Иерархическая структура распределенной системы управления.

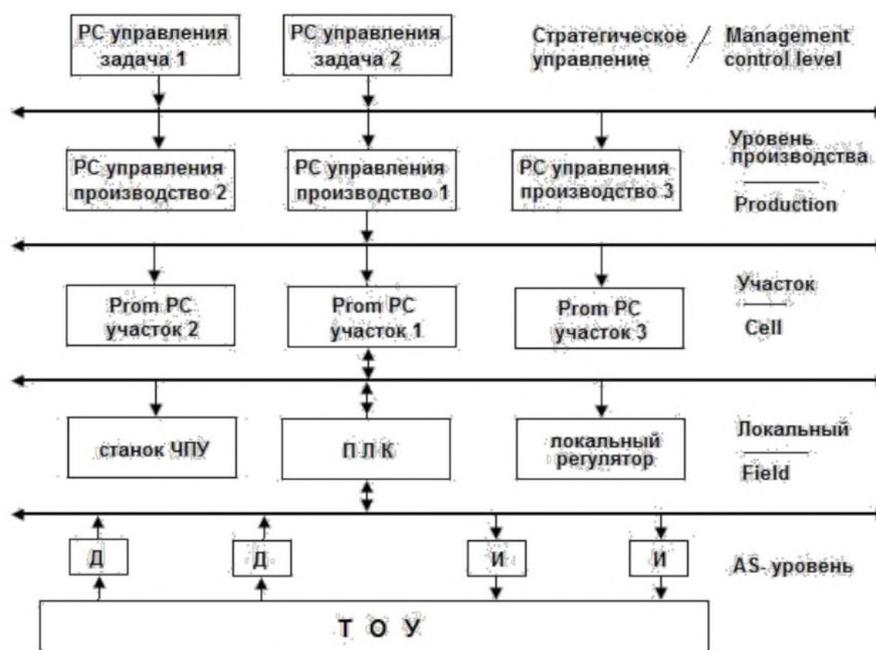


Рис.4.4. Типовая структура распределенной системы управления.

а) Самый нижний уровень (Field, полевой) включает Т О У, управляемый узлом на базе PLC или Prom PC и непосредственно связанные с ним элементы: датчики и исполнительные устройства. На этом уровне обмен информацией производится по AS – интерфейсу. Название AS происходит от слов датчик (Sensor) и исполнительное устройство (Activator).

б) Следующий уровень (PLC, ПЛК) объединяет устройства локального управления и интерфейсы между ними. Этими устройствами являются локальные регуляторы и программируемые логические контроллеры (ПЛК).

в) На следующем уровне (участка (cell)) расположена (SCADA) – система диспетчерского управления и сбора данных.

SCADA системы могут быть 3 видов.

1) DCS – распределенная система управления, обеспечивающая управление в масштабе установки или небольшого цеха. (Siemens, ABB).

Основной элемент такой системы – это функциональный узел на основе PLC или Prom PC. Узлы объединены в разнородную сеть по различным интерфейсам (основной протокол - каждый с каждым).

### 4.3. Устройства сбора и передачи информации (лекция)

ИУ и системы составляют самую многочисленную группу изделий ГСП, составляющую более половины номенклатуры промышленных изделий ГСП. Они обеспечивают получение измерительной информации о физических величинах (параметрах), характеризующих технологические процессы, свойства и качество продукции.

#### Измерительные устройства ГСП. Сигналы и параметры

ИУ и системы составляют самую многочисленную группу изделий ГСП, составляющую более половины номенклатуры промышленных изделий ГСП. Они обеспечивают получение измерительной информации о физических величинах (параметрах), характеризующих технологические процессы, свойства и качество продукции. Классификация ИУ ГСП, учитывающая вид входных и выходных сигналов, приведена на рисунке. Под «естественным» входным сигналом в приведенной классификации понимают выходную физическую величину первичного ИП, полученную однократным простым («естественным») преобразованием измеряемой величины и не соответствующую по параметрам унифицированным сигналам. При этом под простым преобразованием понимают только преобразование, используемым для измерения физическим явлением. Несмотря на большое разнообразие величин, виды естественных выходных сигналов ГСП удается ограничить десятью, приведенными на рисунке 4.1.

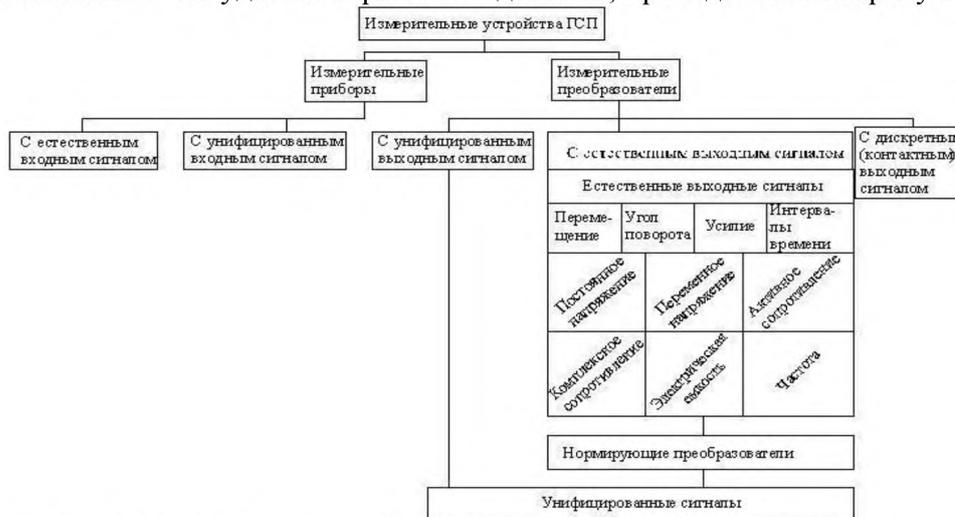


Рис.4.1. Классификация СИ ГСП по входным и выходным сигналам.

Все измеряемые и управляемые величины ГСП делят на 5 групп: теплоэнергетические, электроэнергетические, механические, физические свойства и химический состав. Каждый измеряемый параметр (их больше 30) имеет свое обозначение: I – сила тока, T – температура, K – число оборотов, Q – расход и т.д.

К устройствам получения информации относят: датчики, измерительные и нормирующие преобразователи и кодеры. В составе ее мы рассматривает и АЦП/ЦАП, так как они часто вместе с указанными элементами составляют единый прибор. Датчики: подразделяются также на аналоговые, бинарные дискретные и цифровые датчики, выдающие последовательность импульсов или двоичное слово в некотором коде. Носителем информации может быть один из параметров сигнала: амплитуда, частота, фаза, временные, пространственные соотношения.

Цифровые бинарные датчики имеют два состояния, каждому из которых соответствует свой уровень сигнала, который должен быть преобразован к стандартным значениям «лог. 0» или «лог. 1» для передачи и дальнейшей обработки.

Кодовые датчики (единица измерения - Байт) – выдают цифровой сигнал в одной из систем кодирования: код 2/10 (BCD), код 1248, код Грея, код ASCII, код EBCDIC.

Для преобразования естественного выходного сигнала в унифицированный сигнал в ГСП используются нормирующие преобразователи. Значение нормирования параметров входных и выходных сигналов в ГСП удобно пояснить на примере. Очень широкое распространение получил унифицированный сигнал постоянного тока с диапазоном значений от 0 до 5мА. Если в данном агрегатном комплексе технических средств принят такой сигнал, то это означает, что независимо от вида измеряемого параметра  $X$  и диапазона его значений ( $X_{min}, \dots, X_{max}$ ) ему соответствует на выходе нормализующего преобразователя диапазон сигналов постоянного тока от 0 до 5мА. При этом сигнал не должен изменяться с изменением сопротивления нагрузки на выходе нормализующего преобразователя в диапазоне от 0 до 2,5кОм.

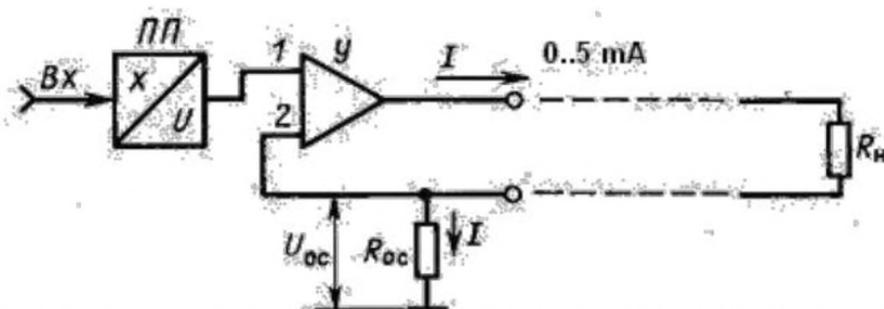


Рис.4.2. Датчик с унифицированным выходным сигналом 0.5 мА.

Установив на выходе преобразователя резистор, например с сопротивлением 1кОм, можно привести сигнал к общему диапазону от 0 до 5В и именно на этот диапазон спроектировать АЦП. Нормализующие преобразователи с выходным сигналом в виде унифицированного тока можно размещать довольно далеко от АЦП – на расстоянии до нескольких километров. В этом случае значение сопротивления подводящих проводов не скажется на точности измерения. Лишь при больших расстояниях (свыше 10км) начинают влиять токи утечки между проводами линии. Рис.4.2.

#### Основные параметры датчиков

Датчик – конструктивно законченный элемент, состоящий из чувствительного элемента и измерительных преобразователей (ИП). С введением унифицированных сигналов в практику приборостроения вошло производство датчиков с унифицированным выходным сигналом. В данном случае датчиком называют объединенные в одном блоке первичный измерительный преобразователь и нормализующий преобразователь. ИП служат для преобразования естественного сигнала чувствительного элемента (первичный преобразователь) в форму, удобную для передачи или обработки. Современные датчики содержат узлы, выполняющие линеаризацию, корректировку и другую обработку сигнала. Пример структурной схемы датчика приведен на рис.4.4.

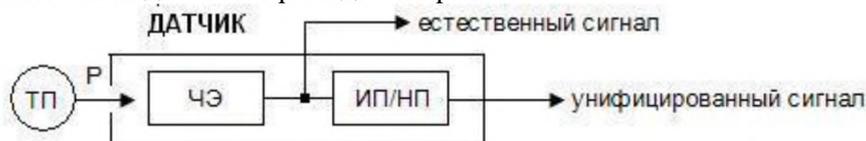


Рис.4.4. Структурная схема датчика.

#### Статическая характеристика датчика

Статическая характеристика датчика (вход-выход) отражает функциональную зависимость выходного сигнала от входного параметра в установившемся режиме.

Статическая характеристика задается: аналитически, графически, таблично. Рис. 4.4. По этой характеристике определяются такие параметры датчика, как чувствительность (коэффициент преобразования), порог чувствительности/разрешения, линейность, величина дрейфа; рабочий/динамический диапазон, параметры гистерезиса и т. д. Для некоторых типов датчиков (термопары ГСП) установлены номинальные статические характеристики (НСХ) и установлены классы точности в соответствии с процентом отклонений от НСХ.

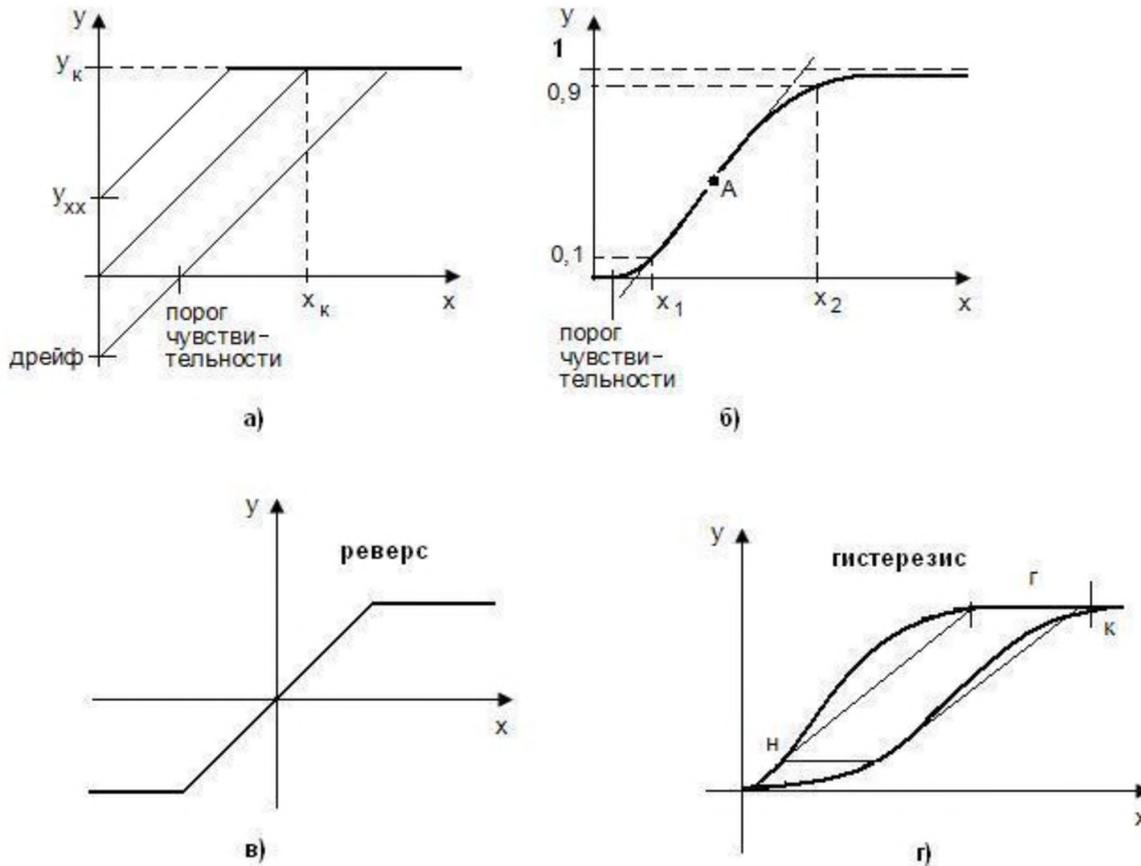


Рис.4.4. Статические характеристики датчиков: а) линейные неревверсивные, б) реальные нелинейные, в) реверсивная, г) гистерезисная.

1) Коэффициент преобразования или коэффициент передачи - это отношение выходной величины элемента  $Y_k$  к входной величине

2) Порогом чувствительности называется минимальная величина на входе элемента, которая вызывает изменение выходной величины. При изменении входной величины  $X$  от 0 до порога выходная величина  $Y$  не изменяется и равна 0. Рис. 4.4. а), б).

3) Линейность. Статические характеристики датчика на рабочем участке (в окрестностях точки А) должны быть линейными, отклонение измеряется в %.

4) Дрейф это смещение характеристики при изменении внешних условий по отношению к стандартным. Рис. 4.4. а).

5) Диапазон измерений – область значений измеряемого сигнала, для которого нормированы измеряемые погрешности. Эта область ограничена пределами измерений наибольшими и наименьшими значениями диапазона измерений.  $D=X_{кз}..X_{п}$ , где  $X_{кз}$  - конечное значение шкалы приборов,  $X_{п}$ - порог чувствительности приборов. Диапазон измерений может состоять из нескольких поддиапазонов. Динамический диапазон используют, если диапазон очень велик.

$$Dd=20*\text{Log}(X_2/X_1)$$

6) Характеристики многих датчиков имеют гистерезис: сигнал датчика при прямом и обратном ходе отличаются, основной показатель гистерезиса ширина петли. Рис. 4.4. г).

7) Реле называется элемент автоматики, в котором при достижении входной величины  $X$  определенного значения, выходная величина изменяется скачком. Зависимость  $Y = f(X)$  является вариантом гистерезиса и имеет форму петли. Рис. 4.5.

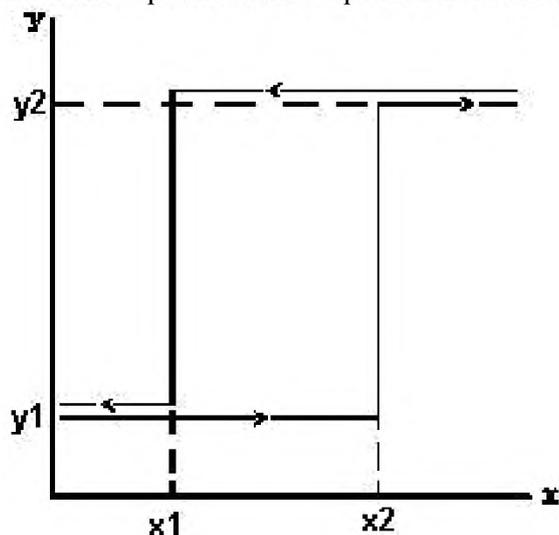


Рис.4.5. Характеристика реле.

Скачкообразное изменение  $Y$  в момент  $X=X_2$  называется величиной срабатывания. Скачкообразное изменение  $Y$  в момент  $X=X_1$  называется величиной отпускания. Отношение величины отпускания  $X_1$  к величине срабатывания  $X_2$  называется коэффициентом возврата. Обычно  $X_2 > X_1$ , поэтому  $K_v = X_1/X_2 < 1$ .

#### Динамическая характеристика датчика

Динамическая характеристика датчика определяет поведение датчика в переходных режимах. Динамические характеристики определяют зависимость выходного сигнала датчика от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних факторов, нагрузки. В зависимости от полноты описания динамических свойств СИ различают полные и частные динамические характеристики. К полным динамическим характеристикам относят переходную характеристику, импульсную переходную характеристику, амплитудно-фазовую характеристику, совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик, передаточную функцию. Частная динамическая характеристика не отражает полностью динамических свойств датчика. Примерами таких характеристик являются время реакции датчика, коэффициент демпфирования, значение резонансной собственной угловой частоты, значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте, запаздывание, время нарастания, время установления, время первого максимума, статическая ошибка, полоса пропускания, постоянная времени.

Для датчиков и измерительных преобразователей время реакции – время установления выходного сигнала, определяемое при скачкообразном изменении входного сигнала и заданной погрешности установления выходного сигнала. Динамические свойства СИ определяют динамическую погрешность.

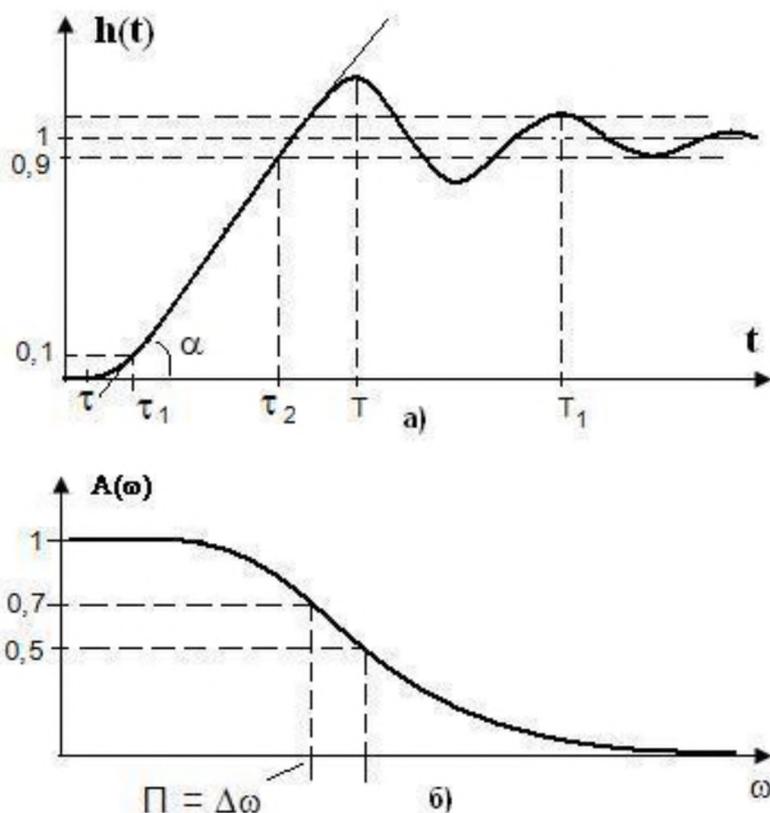


Рис.4.6. Динамические характеристики датчика.

На рисунке обозначены характеристики:

- запаздывание -  $\tau$
- время нарастания -  $\tau_2 - \tau_1$
- время первого максимума -  $T$
- время переходного процесса -  $T_1$
- полоса пропускания -  $\Pi$

#### 4.4. Основные направления развития современных средств автоматизации управления (лекция)

За последние три-четыре года в специальных периодических изданиях появилось большое количество статей, посвященных вопросам интеграции уровней АСУП и АСУТП. Все специалисты сходятся во мнении, что в иерархии управления необходим промежуточный интегрирующий уровень, который мог бы служить мостом между разнородными потоками информации этих уровней (рис. 1). Что касается инструментальных средств (программного обеспечения) для реализации задачи объединения информационных потоков, то их выбор определяется, прежде всего, конкретными условиями (сложившейся на предприятии структурой информационных потоков, используемым на разных уровнях программным обеспечением, действующими протоколами обмена и т. д.), а также потребностями в информации специалистов и руководителей всех уровней.

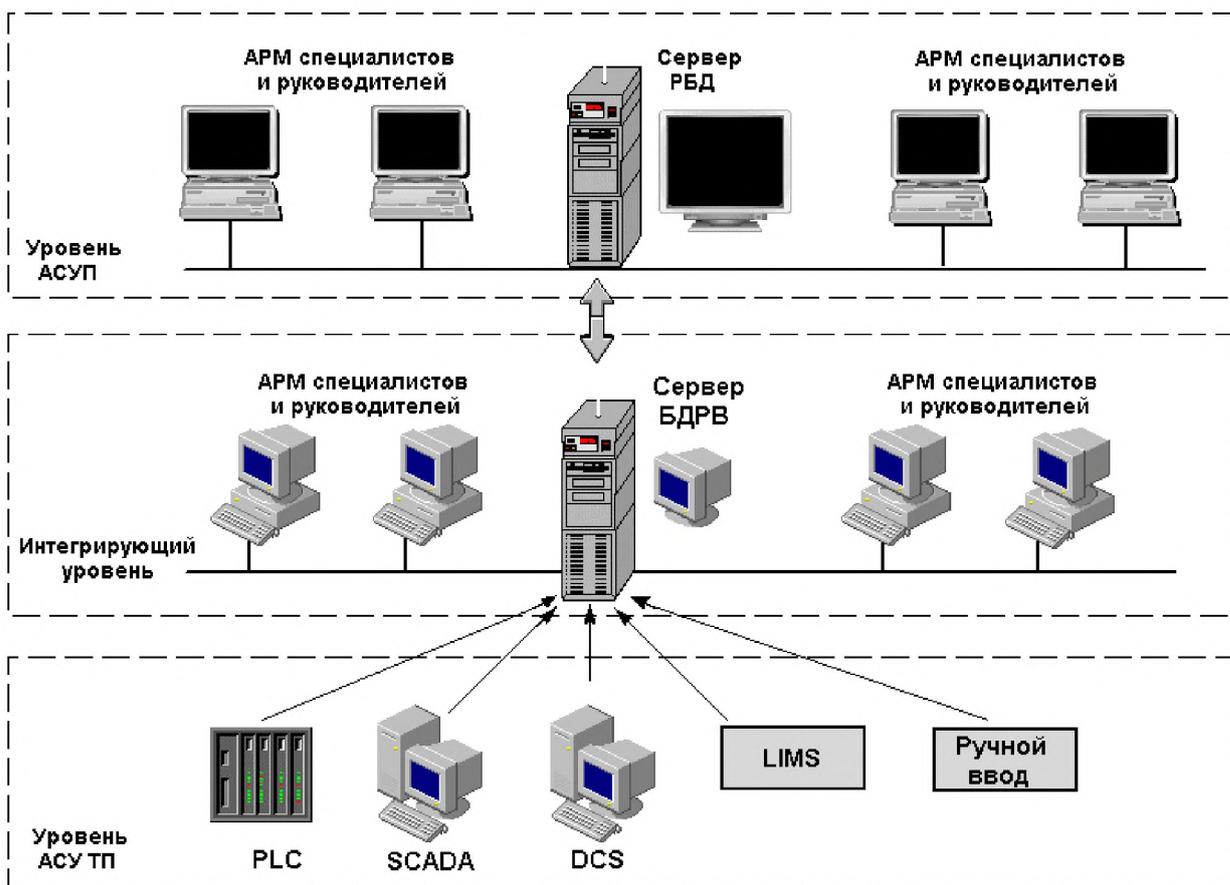


Рис. 1. Интегрированная система управления предприятием.

В общем случае обмен данными между АСУП и АСУ ТП осуществляется по вертикали во встречных направлениях.

Восходящий поток формируется производственной информацией, поступающей с технологических участков, установок и цехов. В основном эта информация передается автоматизированным способом от действующих АСУТП, созданных на базе SCADA и DCS. Результаты лабораторных анализов формируются в лабораторных информационных системах (LIMS - Laboratoire Informatique Management System). Предусмотрен ручной ввод данных, которые не могут быть введены в систему автоматизированным способом. Этот поток данных обеспечивает специалистов и руководителей верхнего уровня сведениями о количественных и качественных показателях переработанного сырья и продуктах переработки, технологических режимах и их нарушениях, состоянии технологического оборудования, потреблении реагентов и энергоносителей, затратах труда и т. д.

Нисходящий поток представляет собой производственные задания, графики работы и ремонтов, технологические регламенты, спецификации на качество вырабатываемых нефтепродуктов и т. п.

Анализ существующих АСУ показывает, что и между подсистемами технологического уровня (горизонтальные связи), и между подсистемами вертикального подчинения происходит интенсивный обмен информацией. В то же время многие каналы связи либо вовсе не автоматизированы, либо автоматизированы недостаточно.

Основные (базовые) функции интегрирующего уровня:

- сбор и унификация информации от различных АСУ ТП предприятия и других источников технологической информации, сильное ее сжатие и долговременное хранение единого архива;
- быстрый доступ к информации любого «клиента» (специалиста или руководителя) и ее представление в едином формате;

- поддержка каналов обмена информацией с уровнем АСУП, представленным такими системами, как SAP/R3, Oracle Application, Baan, Галактика и другими.

На постсоветском пространстве сформировалось несколько основных подходов к автоматизации управления производством в реальном масштабе времени. В этих рамках ведутся работы по созданию информационных систем производства (ИСП), автоматизированных систем оперативного диспетчерского управления (АСОДУ), систем поддержки принятия решений (СППР) и т.п. Как правило, объем реализуемых функций и подходы к решению функциональных задач на различных предприятиях индивидуальны и обусловлены потребностями специалистов в производственной информации на момент внедрения информационной системы.

В различных источниках этот архитектурный уровень управления называют по-разному. Это и понятно - конкретно заниматься созданием интегрированных систем управления предприятием в России еще только начинают. А поэтому и отсутствие единой терминологии.

В мировой практике сформировалась и закрепились идеология MES (Manufacturing Execution Systems). По определению APICS (American Production and Inventory Control Society) MES - это информационная и коммуникационная система производственной среды предприятия. Более развернутое определение дала международная некоммерческая ассоциация MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association). MES-система - это АСУ производственной деятельностью предприятия, с помощью которой в режиме реального времени осуществляются контроль, документирование, планирование и оптимизация производственных процессов от поступления сырья до выпуска готовой продукции.

Используя фактические технологические данные, MES-системы поддерживают всю производственную деятельность предприятия в режиме реального времени. Быстрый результативный отклик на изменяющиеся условия помогает эффективно управлять производственными операциями и процессами. Кроме того, MES-системы формируют данные о текущих производственных показателях, необходимые для функционирования ERP-систем. Таким образом, MES-система - это связующее звено между ориентированными на финансово-хозяйственные операции ERP-системами и оперативной производственной деятельностью предприятия на уровне цеха, участка или производственной линии.



Отсюда следует, что интегрированную автоматизированную систему управления промышленным предприятием можно представить в виде четырех взаимосвязанных уровней управления (рис. слева).

При этом каждый уровень управления характеризуется “своей” интенсивностью циркулирующей в нем информации, своим масштабом времени и своим набором функций.

Контур управления уровня САУ является самым жестким по времени реакции, которое должно измеряться долями секунд и миллисекундами.

Уровень АСУТП является самым интенсивным по объему информации, но, как правило, менее жестким с точки зрения времени. В SCADA-системах происходит накопление и обработка большого числа технологических параметров и создается информационная база исходных данных для производственного уровня.

Оперативно-производственный уровень управления опирается на объективную информацию, поступающую как от АСУТП, так и от других служб производства. Интенсивность информационных потоков здесь существенно ниже и связана с задачами оперативного планирования и оптимизации заданных производственных показателей (качество продукции, производительность, энергосбережение, себестоимость и т.д.). Временные циклы управления составляют минуты, часы, смены, сутки. Оперативное управление производством осуществляется специалистами, которые детально владеют производственной ситуацией (руководители производственных цехов, участков, главные технологи, энергетики, механики и др.). В связи с этим должно повышаться качество и эффективность принимаемых на этом уровне решений.

Стратегический уровень управления освобождается в этом случае от решения оперативных задач производства и обеспечивает поддержку бизнес-процессов предприятия в целом. Поток информации от производственного уровня становится минимальным и включает в себя агрегированную управляющую и отчетную информацию с типовыми временами контроля декада, месяц, квартал. Сюда же поступает информация об аварийных ситуациях, требующих немедленного вмешательства высшего управленческого персонала предприятия.

Задачи, решаемые на уровне управления производством:

Сбор, хранение и предоставление данных

Эта функция обеспечивает информационное взаимодействие различных производственных подсистем для получения, накопления и передачи технологической и управленческой информации, циркулирующей в производственной среде предприятия. Данные о ходе производства могут вводиться как автоматически с заданной периодичностью из АСУТП, так и вручную оперативным персоналом.

- Диспетчеризация производства

Обеспечивает текущий мониторинг и диспетчеризацию процесса производства, отслеживает выполнение операций, занятость оборудования и людей, контролирует в реальном времени выполнение работ в соответствии с планом.

- Оперативное планирование

Эта функция обеспечивает оперативное и детальное планирование работы, основанное на приоритетах, атрибутах, характеристиках и свойствах конкретного вида продукции, а также детально и оптимально вычисляет загрузку оборудования при работе конкретной смены.

- Управление качеством продукции

Предоставляет данные измерений о качестве продукции, в том числе и в режиме реального времени, собранные с производственного уровня, обеспечивая должный контроль качества и привлекая внимание к отклонениям качественных показателей продукции от заданных.

- Управление производственными фондами (техобслуживание)

Поддержка процесса технического обслуживания, планового и оперативного ремонта производственного и технологического оборудования и инструментов в течение всего производственного процесса.

На Западе использование MES-систем считается очевидным, и при решении задач комплексной автоматизации предприятия одновременно ищутся решения для трех взаимосвязанных уровней управления: АСУТП, MES и ERP. В России же подобные системы практически неизвестны и игнорирование их необходимой роли является причиной существенных проблем при создании комплексных систем автоматизации промышленных предприятий.

Разработчики инструментальных систем (в том числе и разработчики SCADA) предлагают использовать в целях интеграции различные типы программных продуктов. Ясно одно: поскольку речь идет о создании единого информационного пространства, одним из основных компонентов программного обеспечения уровня управления производством должны быть базы данных (БД) или архивы, ориентированные на хранение и обработку больших объемов данных реального времени из различных источников. Ведение архива и обработка запросов — это задачи сервера. Не менее важны и клиентские приложения, способные представлять информацию в требуемом виде и формате.

Участок нефтепровода Лазарево-Горький протяженностью 400 км эксплуатируется транспортным предприятием Верхневолжский магистральный нефтепровод (ВВНП). В состав этого объекта управления входят пять нефтеперекачивающих станций (НПС), узлы учета и другие технологические объекты.

Источниками производственно-технологических данных для СППР являются:

1. Система диспетчерского контроля и управления (СДКУ) «Сириус».
2. Автоматизированная система контроля и исполнения договоров с поставщиками и потребителями «АСКИД».
3. Система сбора данных узлов коммерческого учета электрической энергии «Энергия-Модем».

Одной из главных задач, решаемой в системе, является задача объединения всей информации, находящейся в локальных системах автоматизации, действующих на уровне конкретных установок и технологических процессов.

Системы управления различными объектами нефтепровода (НПС, линейные участки, узлы учета и т. д.) реализованы на базе программно-телемеханического комплекса «Сириус» Российской фирмы ВИРА Реалтайм. СДКУ «Сириус» обеспечивает оперативный диспетчерский контроль и управление технологическим процессом перекачки нефти, реализуя при этом следующие функции:

- дистанционное управление магистральными и подпорными агрегатами НПС, задвижками, деблокировкой защит, вспомогательными системами НПС;
- автоматический сбор телесигналов о состоянии НПС, магистральных и подпорных агрегатов, задвижек, вспомогательных систем;
- автоматическое отображение телесигналов на мониторах (мнемосхемы);
- автоматический сбор (циклический и по запросу) аналоговых сигналов измерения давления в нефтепроводе и на НПС, мощности и нагрузок магистральных и подпорных агрегатов с отображением на мнемосхемах;
- формирование общего журнала оперативных сообщений (ТС, ТУ) с указанием даты и времени события;
- формирование документов для вывода на печать: оперативных сообщений, сменных и суточных диспетчерских листов (по регламенту или по запросу).

Информация с объектов управления собирается в территориальном диспетчерском пункте (ТДП), находящемся в Нижнем Новгороде. Этот уровень управления реализован на базе программного обеспечения Сириус-QNX.

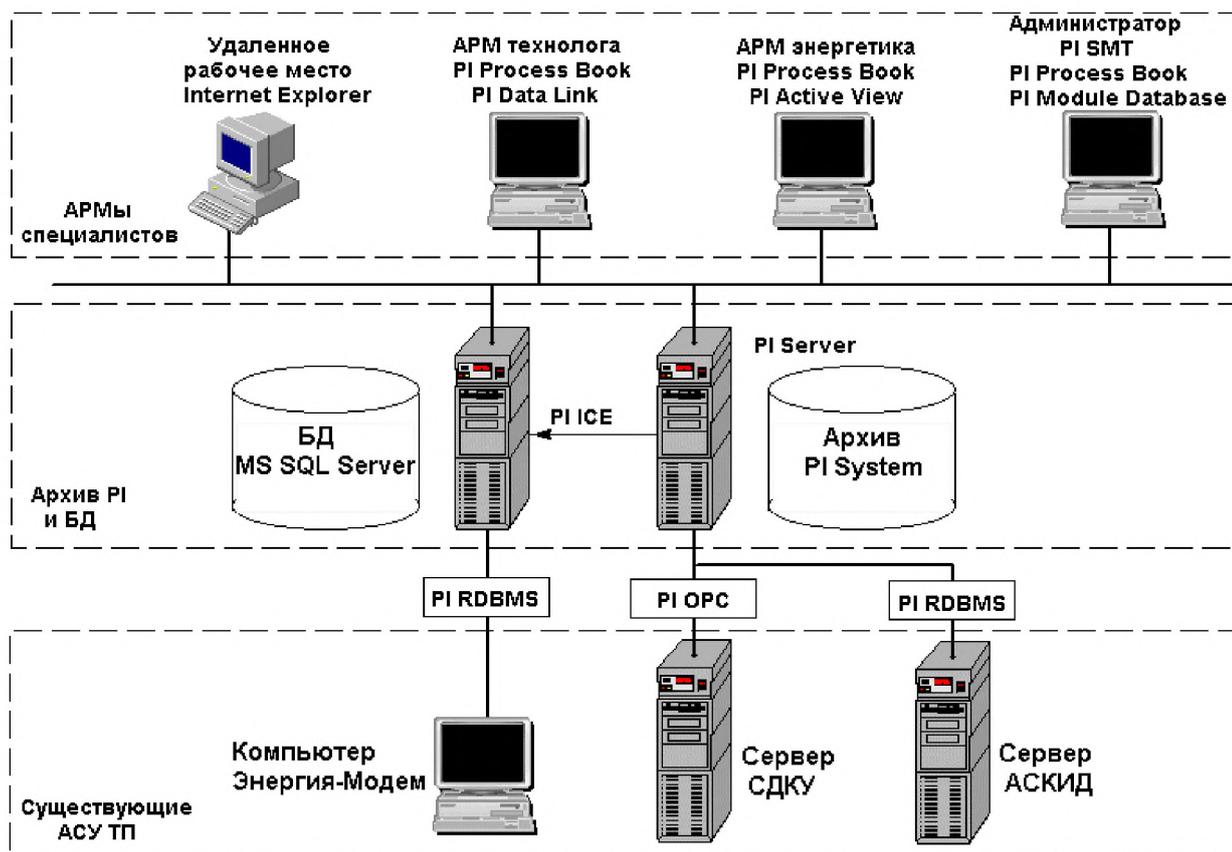
Хотя в электронном виде имеется информация о параметрах функционирования практически всех технологических объектов, существующая система управления не обеспечивает накопления этой информации с целью ее использования производственными службами.

Поскольку каждая АСУ имеет свою структуру, архитектуру и принципы функционирования, то для использования информации реального времени прежде всего необходимо решить задачу получения и унификации данных, а затем - ее представления специалистам.

Целью создания СППР является обеспечение руководства и специалистов ОАО ВВМН достоверной информацией реального времени, необходимой для контроля ключевых показателей деятельности и оперативного управления процессами транспорта нефти, автоматизированного анализа производственной информации с выдачей рекомендаций по ведению производственных процессов в соответствии с принятыми регламентами, алгоритмами, математическими моделями производства и экспертными знаниями.

СППР должна обеспечить:

- автоматический сбор информации реального времени (значений параметров технологических процессов) посредством интерфейсов к функционирующим АСУТП;
- ручной ввод данных о состоянии технологических процессов на объектах, не оборудованных программно-аппаратными средствами АСУТП;
- долговременное и надежное хранение данных в течение нескольких лет в едином хранилище (базе данных реального времени) на жестких дисках сервера и других носителях электронной информации;
- стандартный унифицированный доступ к данным:
  - пользователям - посредством клиентских приложений;
  - внешним автоматизированным системам - посредством интерфейса прикладного программирования или стандартных интерфейсов OPC, ODBC, OLEDB;
- автоматическую обработку и экспертный анализ значений параметров технологических процессов в соответствии с утвержденными алгоритмами и регламентами;
- оперативное планирование работ по устранению причин возникновения ошибок измерений параметров, выдачу рекомендаций по ведению производственных процессов в соответствии с принятыми решениями.



Архитектура СППР приведена на рис. 5.

Рис. 5. Архитектура системы поддержки принятия решения.

В СППР разнородная информация от разных типов источников объединяется в архиве PI-сервера.

В рамках системы поддержки принятия решения предполагается решение целого ряда задач. В данном примере предлагается рассмотреть одну из них - разработку АРМ технолога и АРМ энергетика. Назначение АРМов - представление специалистам всей необходимой информации и обеспечение интеллектуальной обработки данных, их анализа по утвержденным алгоритмам и регламентам.

В рамках организации АРМ технолога реализован следующий комплекс задач:

- Отображение данных о текущем состоянии технологического оборудования нефтепровода.
- Отображение данных о текущей наработке технологического оборудования нефтепровода с начала календарного месяца.
- Вычисление стабильных режимов работы магистральных агрегатов.
- Вычисление стабильных режимов работы линейных участков трубопровода.
- Непрерывный расчет эффективного сечения линейных участков трубопровода.
- Расчет и построение напорной характеристики магистральных агрегатов за произвольный промежуток времени.
- Расчет и построение характеристики КПД магистральных агрегатов за произвольный промежуток времени.

Для реализации задач использовались следующие клиентские приложения PI System:

1. PI Process book (для отображения мнемосхем и навигации по ним, построения трендов);

2. PI Module Database Editor (для построения дерева объектов АРМ Технолога, а также для организации взаимодействия между экранными формами);
3. PI DataLink и PI-SMT (для организации связи между СППР PI System и документами Microsoft Excel при построении отчетов);
4. Подсистема обработки данных PI Totalizer (для расчета средних и накопленных значений);
5. Вычислительная подсистема PI ACE (для ввода плановых значений).

#### 4.5. Методы проведения исследования с MathCad (практическое занятие)

Для отображения и анализа характеристик систем автоматического управления строят логарифмические частотные характеристики.

Наиболее распространенным методом описания и анализа САУ является операционный метод (метод операционного исчисления), в основе которого лежит прямое интегральное преобразование Лапласа для непрерывных функций

$$F(p) = Z \{ f(t) \} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

Это преобразование устанавливает соответствие между функцией действительной переменной  $t$  и функцией комплексной переменной  $p = \alpha + j\beta$ . Функцию  $f(t)$ , входящую в интеграл Лапласа (1), называют оригиналом, а результат интегрирования – функцию  $F(p)$  – изображением функции  $f(t)$  по Лапласу.

Преобразование выполнимо лишь для функций, которые равны нулю при  $t < 0$ . Формально это условие в ТАУ обеспечивается умножением функции  $f(t)$  на единичную ступенчатую функцию  $1(t)$  или выбором начала отсчета времени с момента, до которого  $f(t) = 0$ .

Наиболее важными свойствами преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях являются:

$$\begin{aligned} Z \{ f'(t) \} &= pF(p); \\ Z \{ \int_0^t f(t)dt \} &= F(p) / p. \end{aligned}$$

Операционный метод в ТАУ получил широкое распространение, так как с его помощью определяют так называемую передаточную функцию, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем.

Применяя прямое преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению с использованием свойства (2) получим алгебраическое уравнение

$$\begin{aligned} D(p)Y(p) &= K(p)X(p), \quad (4) \\ \text{где } D(p) &= a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n - \text{собственный оператор;} \\ K(p) &= b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m - \text{входной оператор.} \end{aligned}$$

Передаточная функция – отношение изображения выходной величины изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (7)$$

Тогда с учетом уравнения и обозначений выражение для передаточной функции принимает вид:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}.$$

Значение переменной  $p$ , при которой передаточная функция  $W(p)$  обращается в бесконечность, называется полюсом передаточной функции. Очевидно, что полюсами являются корни собственного оператора  $D(p)$ .

Значение переменной  $p$ , при которой передаточная функция  $W(p)$  обращается в нуль, называется нулем передаточной функции. Очевидно, что нулями являются корни входного оператора  $K(p)$ .

Если коэффициент  $a_0 \neq 0$ , то передаточная функция не имеет нулевого полюса ( $p = 0$ ), характеризуемый ею элемент называют астатическим и передаточная функция этого элемента при  $p = 0$  ( $t = \infty$ ) равна передаточному коэффициенту

$$k = W(0) = \frac{b_m}{a_n}$$

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и САУ в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Они находят применение в ТАУ, так как реальные возмущения, а следовательно и реакции на них элемента или АСУ могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.

Рассмотрим сущность и разновидности частотных характеристик. Пусть на вход линейного элемента (рис 1 а) в момент времени  $t = 0$  подано гармоническое воздействие с частотой  $\omega$

$$x(t) = x_m \sin \omega t. \quad (10)$$

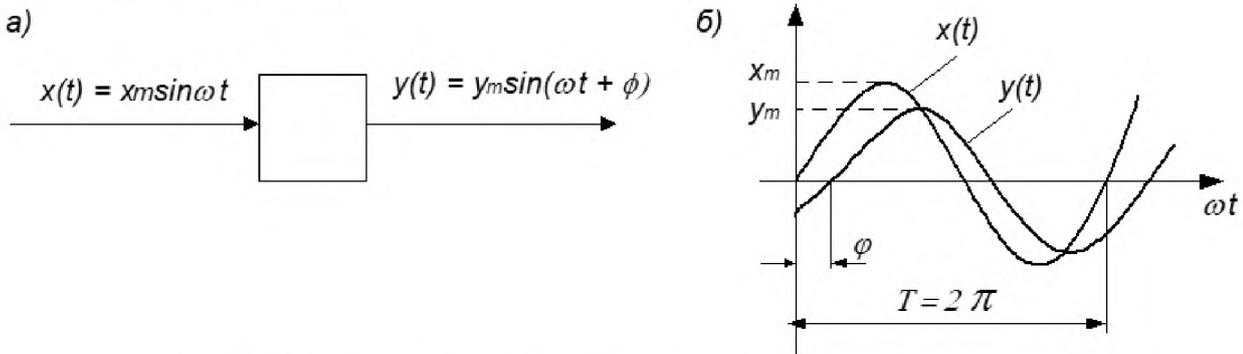


Рис. 1. Схема и кривые, поясняющие сущность частотных характеристик

По завершении переходного процесса установится режим вынужденных колебаний и выходная величина  $y(t)$  будет изменяться по тому же закону, что и входная  $x(t)$ , но в общем случае с другой амплитудой  $y_m$  и с фазовым сдвигом  $\phi$  по оси времени относительно входного сигнала (рис. 1 б):

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \phi). \quad (11)$$

Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) – зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m}. \quad (12)$$

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Частотные характеристики приведены на рис.4.2.

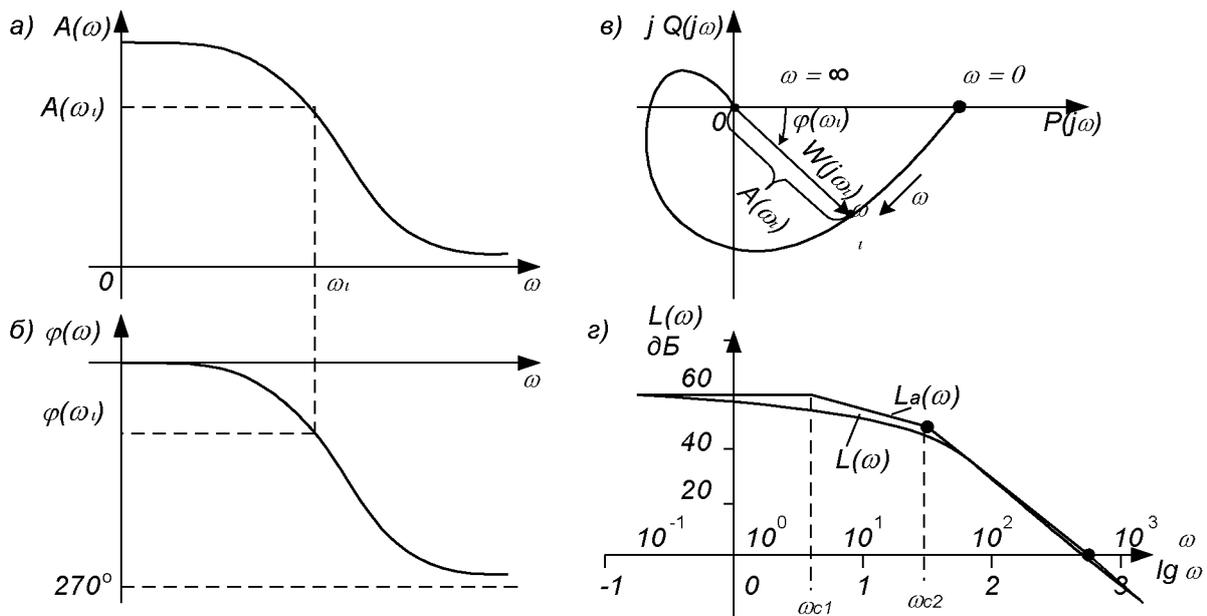


Рис. 4.2. Частотные характеристики:

а – амплитудная; б – фазовая; в – амплитудно-фазовая; г – логарифмическая

Фазовая частотная характеристика ФЧХ – зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты.

ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент при различных частотах. Пример ФЧХ приведен на рис. 2 б.

Амплитудную и фазовую характеристики можно объединить в одну общую – амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ). АФЧХ представляет собой функцию комплексного переменного  $j\omega$  :

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где  $A(\omega)$  – модуль функции;  $\varphi(\omega)$  – аргумент функции.

Каждому фиксированному значению частоты  $\omega_i$  соответствует комплексное число  $W(j\omega_i)$ , которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину  $A(\omega_i)$  и угол поворота  $\varphi(\omega_i)$  (рис. 2 в). Отрицательные значения  $\varphi(\omega)$ , соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительного направления действительной оси.

При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор  $W(j\omega)$  поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно изменяется длина вектора. Кривая, которую при этом опишет конец вектора, и есть АФЧХ. Проекции вектора  $W(j\omega)$  на действительную и мнимую оси называют соответственно действительной и мнимой частотными характеристиками и обозначают  $P(\omega)$ ,  $Q(\omega)$ . Это позволяет записать АФЧХ в алгебраической форме:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (14)$$

АФЧХ, как и любую комплексную величину, можно также представить в тригонометрической форме

$$W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega).$$

Аналитическое выражение для АФЧХ конкретного элемента можно получить из его передаточной функции путем подстановки  $p = j\omega$  :

$$W(j\omega) = W(p) \Big|_{p=j\omega}.$$

Связь между различными частотными характеристиками следующая:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)},$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$$

За единицу длины по оси частот логарифмических характеристик принимают декаду. Декада – интервал частот, заключенный между произвольным значением частоты  $\omega_i$  и его десятикратным значением  $10\omega_i$ .

Отрезок логарифмической оси частот, соответствующий одной декаде, равен 1. В расчетах используют логарифмическую амплитудную частотную характеристику (ЛАЧХ,) ординаты которой измеряют в логарифмических единицах – беллах (Б) или децибеллах (дБ).

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega),$$

Белл – единица измерения мощностей двух сигналов. Если мощность одного сигнала больше (меньше) мощности другого сигнала в 10 раз, то эти мощности отличаются на 1 Б, ( $\lg 10 = 1$ ). Так как мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то при применении этой единицы для измерения отношения амплитуд перед логарифмом появляется множитель 2. Например, если на некоторой частоте  $A(\omega) = 100$ , то это означает, что мощности входного и выходного сигналов отличаются в  $100^2$  раз, т.е. на  $2 \lg 100 = 4$  Б или на 40 дБ, соответственно и  $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 40$  дБ. При построении фазовой частотной характеристики логарифмический масштаб применяют только для оси абсцисс (оси частоты).

На рис. 2 г показаны ЛАЧХ  $L(\omega)$  (толстая линия) и соответствующая ей приближенная (асимптотическая) характеристика  $L_a(\omega)$  в виде прямолинейных отрезков (тонкая линия). Частоты, соответствующие точкам стыковки отрезков, называют сопрягающими и обозначают  $\omega_c$ .

Для выполнения лабораторной работы используется программный пакет MACHCAD

Для выполнения работы применяются следующие команды.

Меню Insert (Вставка)

1. Graph... (Графики...) – построение графиков:

2. X-Y Plot @ (декартов график) – создать двухмерный декартовый график.

3. Polar Plot [Ctrl-7] (полярный график) – создать двухмерный график в полярных координатах.

4. 3D Plot Wizard... – мастер трехмерных диаграмм.

5. Surface Plot [Ctrl-2] (График поверхности) – создать трехмерный график.

6. Contour Plot [Ctrl-5] (Карта линий уровня) – создать контурный график.

7. 3D Scatter Plot (График рассеяния) – создать трехмерную диаграмму.

8. 3D Bar Plot (Трехмерная гистограмма) – создать изображение совокупности столбиков в трехмерном пространстве.

9. Vector Field Plot (Векторное поле) – начертить векторное поле на плоскости.

Основные команды для построения графиков представлены в табл. №1

Таблица №1

Обозначение	Назначение
logspace(d1,d2,n)	Формирует вектор строку, содержащую n равноотстоящих в логарифмическом масштабе друг от друга значений в диапазоне от $10^{d1}$ до $10^{d2}$
Loglog	Создает графики по обеим осям в логарифмическом масштабе
semilogx	Создает графики с логарифмическим масштабом по оси x
semilogy	Создает графики с логарифмическим масштабом по оси y
bode	Построение логарифмических частотных характеристик (диаграмма Боде)

Пример выполнения работы  
 Дана передаточная функция САУ:

$$W(p) = \frac{3p^2 + 2p + 3}{-6p^4 + 3p^3 - 2p + 12}$$

Зададим передаточную функцию в программе MATHCAD:

$$W(p) := \frac{3 \cdot p^2 + 2 \cdot p + 3}{-6 \cdot p^4 + 3 \cdot p^3 - 2 \cdot p + 12}$$

Для построения АЧХ, ФЧХ необходимо выделить реальную и мнимую части уравнения. Для этого заменим "p" на "j\*w":

Здесь j-комплексное число.

$$W(p) \text{ substitute } p = j \cdot w \rightarrow \frac{3 \cdot j^2 \cdot w^2 + 2 \cdot j \cdot w + 3}{-6 \cdot j^4 \cdot w^4 + 3 \cdot j^3 \cdot w^3 - 2 \cdot j \cdot w + 12}$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$W(j \cdot w) \rightarrow \frac{-3 \cdot w^2 + 2 \cdot i \cdot w + 3}{-6 \cdot w^4 - 3 \cdot i \cdot w^3 - 2 \cdot i \cdot w + 12}$$

АЧХ строится по следующей формуле и отображается на рис. 3.

$$A(w) := \sqrt{\operatorname{Re}(W(j \cdot w))^2 + \operatorname{Im}(W(j \cdot w))^2}$$

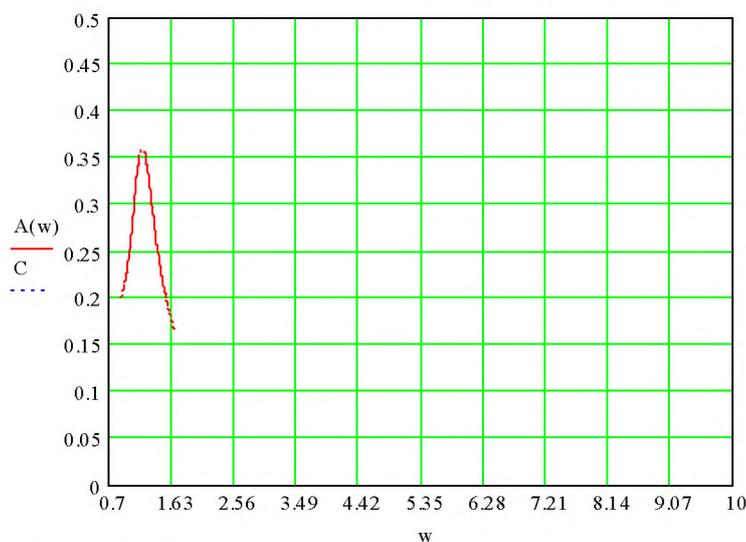


Рис. 4.3. Амплитудная частотная характеристика

Определим косвенные оценки качества системы: показатель колебательности M, резонансную частоту  $w_p$ , частоту среза, полосу пропускания.

$$M := \frac{A_{\max}}{A_0} \quad A_{\max} := 0.37$$

$$M = 1.947 \quad A_0 := 0.19$$

Частота резонанса-частота при которой амплитуда принимает максимальное значение  $w_p=1,17$

Частота среза - частота при которой АЧХ принимает значение "1". В данном примере такая частота отсутствует.

Полоса пропускания частот-интервал частот, при котором прохождение сигнала является наилучшим.

$$C := \frac{\sqrt{2} \cdot A_{\max}}{2}$$

Полоса пропускания определяется следующим

интервалом:

$$(w1;w2)=(0.8;1.5)$$

Построим ФЧХ. Она строится по следующей формуле:

$$F(w) := \operatorname{atan} \left( \frac{\operatorname{Im}(W(j \cdot w))}{\operatorname{Re}(W(j \cdot w))} \right)$$

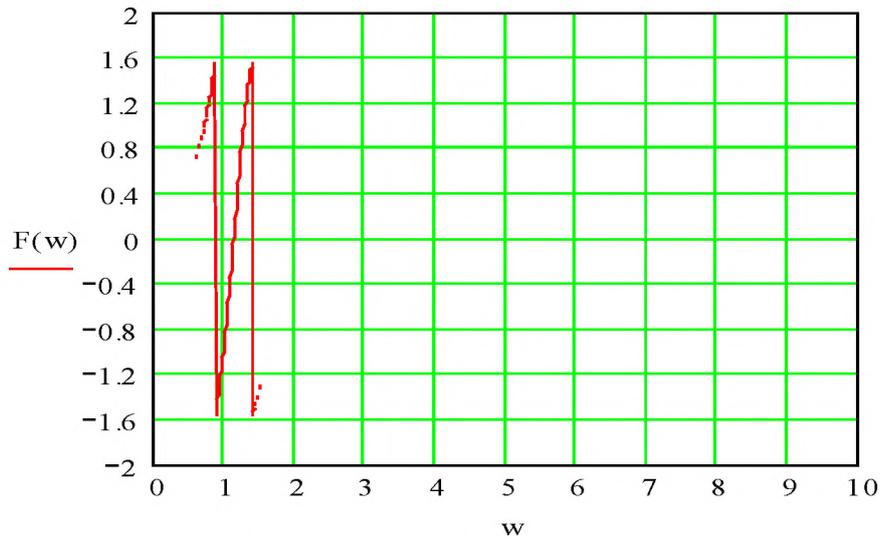


Рис.4.4 Фазо- частотные характеристика

Построим ЛАЧХ нашей системы:

$$L(w) := 20 \log(A(w))$$

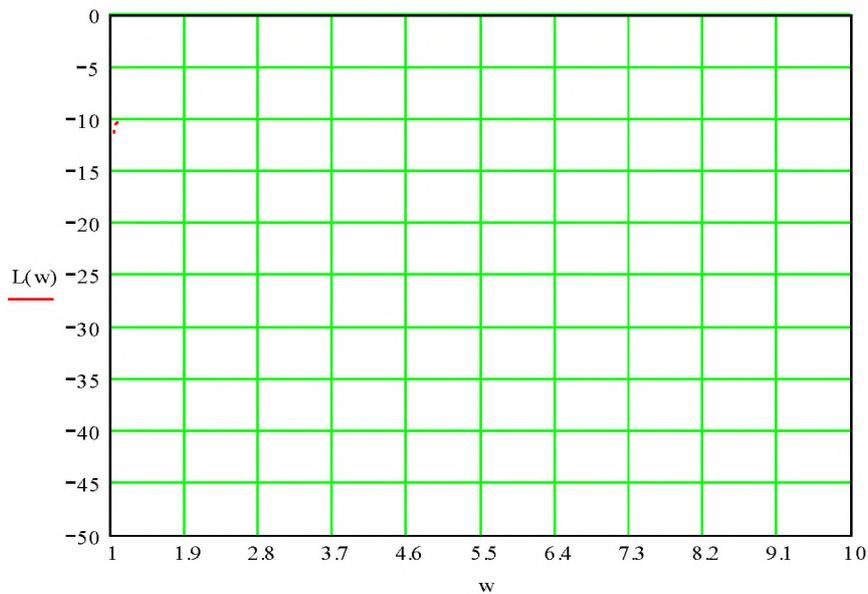


Рис. 4.5. Логарифмируемая амплитудо-частотная характеристика

Построим Логарифмические характеристики в мпрограмме Matlab с помощью функции bode.

Зададим передаточную функции следующим образом:

```
>> W=tf([-3 -2 -3],[-6 -3 +2 -12])
```

Transfer function:

$$3 s^2 + 2 s + 3$$

$$6 s^3 + 3 s^2 - 2 s + 12$$

```
>> bode
```

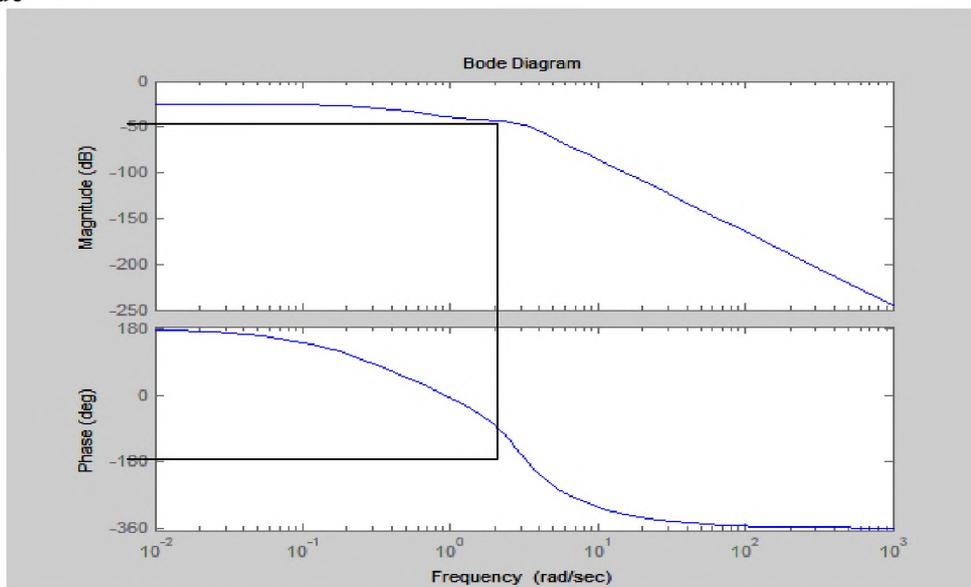


Рис. 4.6. Логарифмические частотные характеристики

Определим запасы устойчивости по фазе и амплитуде:

Запас по фазе не возможно определить так как ЛАЧХ не пересекается с нулем.

Запас устойчивости по амплитуде равен 50 дБ/дек.

#### ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Изучить теоретические сведения.
2. Запустить программу MATHCAD.
3. Написать заданную функцию звена или системы.
4. Произвести замену  $p$  на  $j\omega$ .
5. Выделить мнимую и действительную часть в передаточной функции.
6. Построить АЧХ.
7. Определить косвенные оценки качества системы.
8. Построить ФЧХ.
9. Построить ЛАЧХ.
10. Запустит программу MATLAB.
11. Создать TF-объект в соответствии с заданной передаточной функции.
12. Создать дифференциальное уравнение, определяющее функции.
13. Построить ЛАЧХ с помощью команды bode.
14. Провести аппроксимацию графика.
15. Определить запасы устойчивости по фазе и амплитуде.
16. Ответить на контрольные вопросы.
17. Оформить отчет.

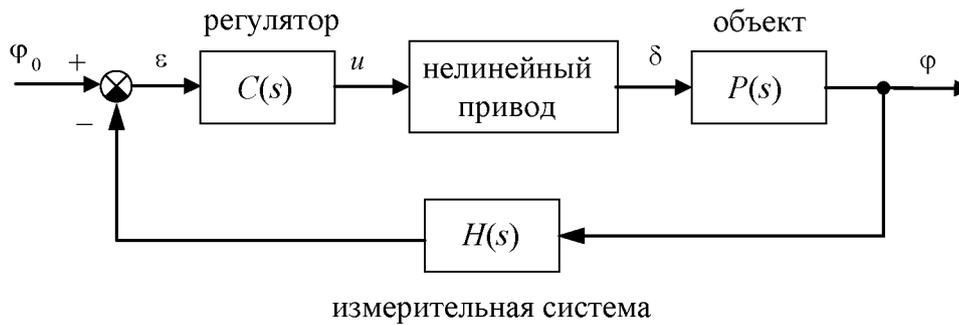
18. Сдать отчет преподавателю и защитить работы.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ Таблица №2

№	Вид передаточной функции
1	$W = \frac{6p+2}{p^5+6p^3+2p+1}$
2	$W = \frac{3p+8}{2p^5+2p^3+p+4}$
3	$W = \frac{6p+2}{p^5+4p^4+6p^3+2p^2+p+5}$
4	$W = \frac{-7p+3}{p^5+4p^4+p+2}$
5	$W = \frac{-9p^2+1}{5p^5+2p^4+p^3+4p^2+1}$
6	$W = \frac{3p+3}{4p^4+p^3+2p+p}$
7	$W = \frac{-4p^2}{-p^5-9p^3+2p^2+7}$
8	$W = \frac{-p+2p+6}{5p^5+9p^4-2p^3+12p^2+p+3}$
9	$W = \frac{7p+5}{4p^4-6p^3+6p^2+p+9}$
10	$W = \frac{p-9}{5p^7-2p^4+6p^2+p}$
11	$W = \frac{7p+5}{4p^3-5p^2+p-1}$
12	$W = \frac{-p-1}{4p^4-6p^3+6p^2+p+9}$
13	$W = \frac{4p}{p^4-p^3+6p^2+p+6}$
14	$W = \frac{-p^2-8p+2}{-6p^5+3p^2+6p+4}$
15	$W = \frac{-p-2}{2p^7+7p^5+6p^3+7p+1}$

#### 4.6. Методы проведения исследования с MatLab (практическое занятие)

В работе рассматривается система управления судном по курсу. Ее структурная схема показана на рисунке.



Структурная схема системы стабилизации судна на курсе

Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\dot{\phi} = \omega_y$$

$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K}{T_s} \delta$$

где  $\phi$  – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса),  $\omega_y$  – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси,  $\delta$  – угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия,  $T_s$  – постоянная времени,  $K$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*. Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}.$$

Линейная модель привода (рулевой машины) представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s},$$

охваченное единичной отрицательной обратной связью. На угол перекладки руля и скорость перекладки накладываются нелинейные ограничения

$$|\dot{\delta}(t)| < 3 \text{ } ^\circ/\text{сек}, \quad |\delta(t)| < 30^\circ.$$

Для измерения угла рыскания используется гирокомпас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией<sup>1</sup>

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1},$$

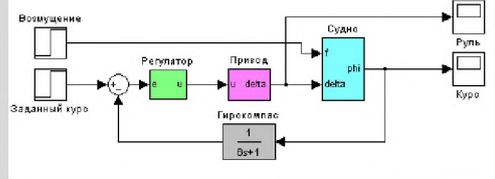
В качестве управляющего устройства используется ПИД-регулятор с передаточной функцией<sup>2</sup>

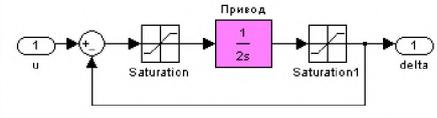
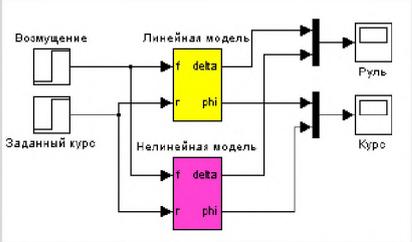
$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{T_s s + 1}{T_v + 1} \right) + \frac{1}{T_I s}, \text{ где } T_v = 1 \text{ сек и } T_I = 200 \text{ сек.}$$

### Инструкция по выполнению работы

<sup>1</sup> Численные значения  $K$ ,  $T_s$ ,  $T_R$  и  $T_{oc}$  надо взять из таблицы в конце файла. Они должны совпадать с данными, которые использовались Вами в лабораторных работах № 2 и 3.

<sup>2</sup> Значение  $K_c$  было определено в лабораторной работе № 2.

Этап выполнения задания	Команды MATLAB
1. Сделайте свою папку рабочей папкой MATLAB.	ЛКМ по кнопке  справа от поля Current Directory
2. Откройте окно рабочей папки.	View – Current directory
3. Откройте модель, построенную в лабораторной работе № 3.	двойной щелчок на lab3.mdl
4. Сохраните модель в своей папке под именем lab4.mdl.	 File – Save as ...
5. Выделите мышью регулятор вместе с интегратором и преобразуйте его в подсистему.	 Edit – Create subsystem
6. Дайте подсистеме имя Регулятор, расположите название сверху и выберите фоновый цвет на свой вкус.	Двойной щелчок на имени ПКМ – Format – Flip name ПКМ – Background color
7. Определите для входа и выхода этого блока имена e и u соответственно.	Двойной щелчок на блоке ЛКМ на имени входа или выхода
8. Аналогично постройте подсистему Привод с входом u и выходом delta и подсистему Судно с входами f и delta и выходом phi. Сохраните модель и скопируйте ее через буфер обмена в отчет.	
9. Обведите мышью (при нажатой ЛКМ) все блоки, кроме источников сигналов и осциллографов. Создайте подсистему Линейная система с входами g (заданный курс) и f (возмущение) и выходами phi и delta.	 Edit – Create subsystem
10. Скопируйте блок Линейная система и измените его имя на Нелинейная система. Подключите к входам нового блока те же сигналы (заданный курс и возмущение), что и для первого блока. Установите для блока линейной системы желтый фоновый цвет, а для нелинейной – фиолетовый.	Перетащить с помощью ПКМ Format – Background color
11. Откройте подсистему Привод в нелинейной системе. Мы построим нелинейную модель привода, учитывая ограничения на угол перекладки руля и скорость его изменения.	Двойной щелчок на блоке
12. Удалите соединительные линии.	ЛКМ на элементе, нажать Delete.
13. Измените передаточную функцию на $R_0(s) = \frac{1}{T_R s}$ .	Двойной щелчок на блоке • Denominator

14. Откройте окно <i>Library Browser</i> .	 View – Library Browser
15. Перетащите в окно модели блок Sum из группы Math Operations. Измените его так, чтобы организовать отрицательную обратную связь.	Двойной щелчок на блоке  + - в поле List of signs
16. Перетащите в окно модели два блока Saturation (насыщение) из группы Discontinuities. Расположите один блок перед интегратором (ограничение на скорость перекаладки), второй – после (ограничение на угол перекаладки).	
17. Введите нужные пределы допустимых значений, так чтобы скорость перекаладки руля была не более 3 градусов в секунду, а угол перекаладки – не более 30 градусов. В отчете укажите все установленные значения.	Двойной щелчок на блоке <ul style="list-style-type: none"> <li>• Upper limit</li> <li>• Lower limit</li> </ul>
18. Соедините блоки нужным способом. Сохраните модель. Скопируйте схему нелинейной подсистемы Привод в отчет.	
19. Закройте лишние окна и перейдите в главное окно модели. Освободите оба осциллографа от связей, перетащив их вправо при нажатой клавише Shift.	
20. Перетащите в окно модели два блока Mux (мультиплексор) из группы Signal Routing. Эти блоки служат для объединения сигналов в «жгут» (многожильный кабель).	
21. Соедините входы первого блока с сигналами управления (delta) линейной и нелинейной систем, а выход – с входом осциллографа Руль.	
22. Аналогично соедините входы второго мультиплексора с сигналами выхода (phi) линейной и нелинейной систем, а выход – с входом осциллографа Курс.	
23. Сохраните модель и скопируйте ее через буфер обмена в отчет.	
24. Установите заданный курс 10 градусов и возмущение 0. Выполните моделирование и посмотрите результаты. Жёлтый график показывает изменение первого входа осциллографов – (линейная система), фиолетовый – второго (нелинейная система).	
25. Объясните расхождение между результатами моделирования линейной и нелинейной системы. Какое нелинейное звено существенно влияет на результат?	
26. Создайте новый M-файл.	File – New – M-file

<p>27. В окне редактора введите команды для вывода графиков переходных процессов по курсу. Теперь массив <math>\phi</math> содержит 3 столбца: время и сигналы с двух входов осциллографа (выходы линейной и нелинейной системы). Весь текст справа от знака % считается комментарием. Третий параметр команды plot означает цвет: 'b' – синий, 'g' – зеленый, 'r' – красный и т.д. (см. справку по этой команде). Команда hold on означает, что не надо стирать старый график, hold off – надо.</p>	<pre>figure(1); % открыть рис. 1 subplot(2,1,1); plot(phi(:,1),phi(:,2),'b'); hold on; plot(phi(:,1),phi(:,3),'g'); hold off; legend('Линейная система', ...       'Нелинейная система')</pre>
<p>28. Сохраните файл под именем lab4graph.m.</p>	<p>File - Save</p>
<p>29. Запустите файл (скрипт<sup>3</sup>) на выполнение. Если график не появился на экране, смотрите сообщения об ошибках в командном окне MATLAB.</p>	<p>клавиша F5</p>
<p>30. Увеличьте размер шрифта, вставив эту команду сразу после вызова subplot. Здесь gca означает текущие оси координат (<i>get current axis</i>). Еще раз запустите скрипт.</p>	<pre>set(gca,'FontSize',16);</pre>
<p>31. Добавьте в скрипт название графика и осей координат, так же, как и в работе № 3.</p>	<pre>title('Поворот на 10 градусов') xlabel('Время, сек'); ylabel('\phi, град');</pre>
<p>32. Увеличьте толщину линий. С помощью функции get мы сначала получаем массив указателей (хэндлов, <i>handle</i>) на все объекты-линии. Затем с помощью функции set устанавливаем для каждой линии свойство LineWidth (толщина линии), равное 1,5 пункта. Сохраните файл и запустите его на выполнение.</p>	<pre>h = get(gca, 'Children') set(h(1),'LineWidth',1.5) set(h(2),'LineWidth',1.5)</pre>
<p>33. Добавьте в скрипт команды, с помощью которых в нижней половине окна на одном графике строятся кривые изменения сигнала управления в линейной и нелинейной системах. Не добавляйте заголовок для этого графика (он будет мешать верхнему графику).</p>	
<p>34. Добейтесь, чтобы скрипт работал правильно. Скопируйте текст скрипта в отчет.</p>	
<p>35. Запустите скрипт на выполнение. Скопируйте полученный график в отчет.</p>	
<p>36. Измените величину заданного курса на 90 градусов и снова проведите моделирование.</p>	 <p>Двойной щелчок на блоке Заданный курс ввести 90 в поле Final value</p>
<p>37. Перейдите в окно редактора и измените название графика на «Поворот на 90 градусов». Снова запустите скрипт и скопируйте построенный график в отчет.</p>	<pre>title('Поворот на 90 градусов') клавиша F5 print -dmeta</pre>

<sup>3</sup> Скриптом называется файл, содержащий команды MATLAB. При его запуске команды выполняются последовательно одна за другой.

Таблица коэффициентов

Вариант	$T_s$ , сек	$K$ , рад/сек	$T_R$ , сек	$T_{oc}$ , сек
1.	16.0	0.06	1	1
2.	16.2	0.07	2	2
3.	16.4	0.08	1	3
4.	16.6	0.07	2	4
5.	16.8	0.06	1	5
6.	17.0	0.07	2	6
7.	17.2	0.08	1	1
8.	17.4	0.07	2	2
9.	17.6	0.06	1	3
10.	17.8	0.07	2	4
11.	18.0	0.08	1	5
12.	18.2	0.09	2	6
13.	18.4	0.10	1	1
14.	18.6	0.09	2	2
15.	18.8	0.08	1	3

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ПРОГРАММЫ

Процесс изучения материала программы предусматривает активное использование современных инновационных образовательных технологий. Формы обучения: индивидуальные и групповые. Методы обучения:

- работа с преподавателем, - работа в коллективе обучающихся,
- самостоятельная работа.

При освоении дисциплины используются следующие виды активной и интерактивной форм обучения для достижения запланированных результатов обучения и формирования компетенций:

- совместное погружение в проблемное поле;
- обсуждение сложных вопросов и проблем;
- работа в малых группах; - разборы конкретных ситуаций и т.д. Процесс освоения дисциплины предусматривает следующие работы:

1. Контактная работа (аудиторная работа: лекционные, практические, мастер-классы, консультации);
2. Самостоятельная работа;
3. Контрольные мероприятия (промежуточные и итоговые аттестации).

## **Методические указания для обучающихся по лекционным занятиям по модулю**

Лекция является наиболее экономичным способом передачи учебной информации, т.к. при этом обширный материал излагается концентрированно, в логически выдержанной форме, с учетом характера профессиональной деятельности обучаемых. Лекция закладывает основы научных знаний в обобщенной форме. На лекционных занятиях преподаватель:

- знакомит обучающихся с общей методикой работы над курсом;
- дает характеристику учебников и учебных пособий, знакомит слушателей с обязательным списком литературы;
- рассказывает о требованиях к промежуточной аттестации;
- рассматривает основные теоретические положения курса;
- разъясняет вопросы, которые возникли у обучающихся в процессе изучения курса. Лекционное занятие преследует 5 основных дидактических целей:
- информационную (сообщение новых знаний);
- развивающую (систематизация и обобщение накопленных знаний);
- воспитывающую (формирование взглядов, убеждений, мировоззрения);
- стимулирующую (развитие познавательных и профессиональных интересов);
- координирующую с другими видами занятий.

В процессе прослушивания лекций очень важно умение обучающихся конспектировать наиболее значимые моменты теоретического материала. Конспект помогает внимательнее слушать, лучше запоминать в процессе записи, обеспечивает наличие опорных материалов при подготовке к лабораторным занятиям и промежуточной аттестации. В этой же тетради следует записывать неясные вопросы, требующие уточнения на занятии. Рекомендуется в тетради отвести место для словаря, куда в алфавитном порядке вписываются специальные термины и пояснения к ним.

## **Методические указания для обучающихся по практическим занятиям по модулю**

Практическое занятие – форма систематических учебных занятий, с помощью которых обучающиеся изучают тот или иной раздел определенной научной дисциплины, входящей в состав учебного плана.

Для того чтобы практические занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнение и решение заданий проводятся по вычитанному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных вопросов лекционного курса. Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на практических занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций, задач. При этих условиях обучающийся не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном решении заданий нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если обучающийся видит несколько путей решения проблемы, то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы. Решение проблемных заданий или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что решение каждого учебного задания должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Полученный ответ следует проверить способами, вытекающими из существа данного задания. Полезно также (если возможно) решать несколькими способами и сравнить полученные результаты. Решение заданий данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

При подготовке к практическим занятиям следует использовать основную литературу из представленного списка, а также руководствоваться приведенными указаниями и рекомендациями. Для наиболее глубокого освоения дисциплины рекомендуется изучать литературу, обозначенную как «дополнительная» в представленном списке. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий.

Обучающемуся рекомендуется следующая схема подготовки к занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы плана семинарского занятия;
4. Выполнить домашнее задание;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

В процессе подготовки изучают рекомендованные преподавателем источники литературы, а также самостоятельно осуществляют поиск релевантной информации.

Достижение целей эффективной подготовки обучающихся и развитие профессиональных компетенций невозможно без их целеустремленной самостоятельной работы. Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, текущему контролю и промежуточной аттестации.

Основная цель данного вида занятий состоит в обучении методам самостоятельной работы с учебным материалом, нормативно-правовыми актами, научной литературой, с ситуационными задачами, развитие способности самостоятельно повышать уровень профессиональных знаний, реализуя специальные средства и методы получения нового знания, и использовать приобретенные знания и умения в практической деятельности. Состав самостоятельной работы:

1. Подготовка к лекционным и практическим занятиям:
  - чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы и т.д.);
  - составление плана текста, графическое изображение структуры текста, конспектирование текста, выписки из текста и т.д.;
  - работа с конспектом;
  - подготовка вопросов для самостоятельного изучения
2. Подготовка к лабораторным занятиям:
  - работа со справочниками и др. литературой;
  - формирование отчета о выполнении лабораторного занятия;
  - подготовка мультимедиа презентации и докладов к выступлению по результатам лабораторного занятия;
3. Подготовка к мастер-классам:
  - обучающиеся должны ознакомиться с анонсом мероприятия, предусмотренных программой мастер-класса;
  - необходимо предварительно ознакомиться со структурой предприятия, на базе которого будет проводиться мастер-класс, основными направлениями, которыми занимается предприятие или компания.
4. Подготовка к промежуточной и итоговой аттестациям:
  - повторение всего учебного материала модуля
  - аналитическая обработка текста; периодического, продолжающегося издания или сборника как составная часть его основного текста.

### **Методические указания для обучающихся по промежуточной и итоговой аттестации по дисциплине (модулю)**

В период подготовки к промежуточной и итоговой аттестации обучающихся вновь обращаются к пройденному учебному материалу. При этом они не только закрепляют полученные знания, но и получают новые. Подготовка обучающегося к аттестации включает в себя три этапа:

- самостоятельная работа в течение курса;
- непосредственная подготовка в дни, предшествующие промежуточной и итоговой аттестации по темам курса;
- подготовка к ответу на вопросы.

Подготовка к аттестации осуществляется на основании списка вопросов по изучаемому курсу, конспектов лекций, учебников и учебных пособий, научных статей, информации среды интернет. Литература для подготовки к промежуточной аттестации рекомендуется преподавателем. Для полноты учебной информации и ее сравнения лучше использовать не менее двух источников. Обучающийся вправе сам придерживаться любой из представленных в литературе точек зрения по спорной проблеме (в том числе отличной от преподавателя), но при условии достаточной научной аргументации.

Основным источником подготовки к промежуточной и итоговой аттестации является конспект лекций, где учебный материал дается в систематизированном виде, основные положения его детализируются, подкрепляются современными фактами и информацией, которые в силу новизны не вошли в опубликованные печатные источники.

В ходе подготовки к аттестации обучающимся необходимо обращать внимание не только на уровень запоминания, но и на степень понимания излагаемых проблем. Для подготовки к аттестации преподаватель проводит консультацию по возникающим вопросам. Промежуточная аттестация проводится по вопросам, охватывающим весь пройденный материал. По окончании ответа преподаватель может задать обучающемуся дополнительные и уточняющие вопросы. Оценка качества подготовки обучающихся осуществляется в двух основных направлениях: оценка уровня освоения дисциплин и оценка уровня сформированности компетенций обучающихся. Предметом оценивания являются знания, умения и практический опыт обучающихся.

Положительно будет оцениваться стремление обучающихся изложить различные точки зрения на рассматриваемую проблему, выразить свое отношение к ней, применить теоретические знания по современным проблемам.