

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 18.06.2023 16:02:17

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра биомедицинской инженерии



**Лабораторный практикум по дисциплине  
«Теоритические основы кибернетики»: часть 2**

для студентов специальности  
30.05.03 «Медицинская кибернетика»

Курск 2023

УДК 007+517.977+681.51

Составители: М.В. Артеменко

Рецензент

- доктор технических наук, профессор Чернецкая И.Е.

**Лабораторный практикум по дисциплине «Теоретические основы кибернетики: часть 2 / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. М.В. Артеменко, 2023. - 193 с.**

Лабораторный практикум содержит краткие теоретические сведения, порядок выполнения и содержание отчета по практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы кибернетики» и соответствуют требованиям Федерального государственных образовательных стандартов высшего образования по специальности 30.05.03 «Медицинская кибернетика». В лабораторном практикуме рассматриваются вопросы: анализа и синтеза систем управления, преобразования передаточных функций, линейного и динамического программирования, математического моделирования по результатам мониторинга, кодирования и обработки биомедицинских сигналов, применение искусственных нейронных систем, содержание информационных порталов по медицинской кибернетике, инженерно-психологического проектирования интерфейса, анализа и синтеза цифровых управляющих автоматов, синтеза и эксплуатации автоматизированных систем поддержки принятия решений в кибернетике, приведен тестовый материал. Предназначено для студентов для студентов специальности 30.05.03 «Медицинская кибернетика»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать

Формат 60x84x 1/16.

Усл.печ.л.

. Уч.-изд.л.

. Тираж 100 экз. Заказ.

Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября,94

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. МАСШТАБИРОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕТРИК ХАРАКТЕРИСТИК ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ.....</b>	<b>42</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СУ БТС.....</b>	<b>49</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТЫ №3. (ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ) ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ САУ БТС.....</b>	<b>52</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО УРАВНЕНИЮ ДИНАМИКИ.....</b>	<b>64</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ БТС.....</b>	<b>68</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЙ «ВХОД»- «ВЫХОД» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>75</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 7. ИНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ.....</b>	<b>96</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ГРАФОВ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ.....</b>	<b>105</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №9. СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>120</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>130</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 11. КОДИРОВАНИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....</b>	<b>149</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12. ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ (ПАКЕТЫ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ).....</b>	<b>163</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №13. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОРТАЛОВ, ПОСВЯЩЕННЫХ СИСТЕМАМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ.....</b>	<b>176</b>
<b>ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕННЫХ ЗНАНИЙ И НАВЫКОВ ....</b>	<b>184</b>

## **Введение**

**Структура** методических указаний по выполнению практических занятий: цель и задачи работы, информационные материалы (краткие теоретические сведения), методические указания по выполнению работы, библиография.

### **Порядок выполнения.**

1. Изучить информационные материалы к занятию, включая рекомендованную литературу и лекции.
2. Выполнить работу согласно методическим указаниям.
3. Осуществить обработку полученных результатов.
4. Оформить отчет к работе.
5. Подготовиться к отчету – собеседованию с преподавателем по тематике работы (защите полученных результатов) или обсуждению результатов в студенческой группе.

### **Содержание отчета.**

1. Цель работы. Постановка задач исследований.
2. Этапы проведения, полученные результаты, анализ и выводы.
3. Ответы на контрольные вопросы (не менее 3), аннотации содержания изученных информационных источников (100-200 слов по каждому).

В заключительной части указаний приведен тестовый материал, рекомендуемый для рубежного контроля, подготовки к зачету и экзамену, автоматизированному тестированию текущих и остаточных знаний, самоконтролю усвоенных знаний, умений и навыков. Автор выражает глубокую благодарность студентам специальности «Медицинская кибернетика» (гр. МК31, 2013 года поступления), первыми принявшими участие в апробации и отладки комплекса.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. МАСШТАБИРОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕТРИК ХАРАКТЕРИСТИК ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.**

**Цель работы:** ознакомление и приобретение навыком описания медико-биологических объектов по результатам измерений его характеристик в различных модальностях и метриках и приемами перехода между метриками и модальностями.

### **Краткие теоретические сведения.**

Под понятием **метрика** в различных областях знаний подразумеваются следующие семантические нагрузки:

- функция, определяющая расстояния в некотором метрическом пространстве.
- альтернативное название метрического тензора, в частности
- 4-тензор, который определяет свойства пространства-времени в общей теории относительности.
- греческое учение о строении стихотворной речи, её ритмики.
- раздел теории музыки, посвящённый изучению музыкального метра.
- дворянская родословная книга
- принятое в обиходе название свидетельства о рождении, или метрической книги.
- числовое значение, влияющее на выбор маршрута в компьютерных сетях. В случае статической маршрутизации это значение обычно не изменяется в пределах сессии.
- мера, позволяющая получить численное значение некоторого свойства программного обеспечения.

В случае анализа биомедицинской информации используется понятие метрики в математическом смысле для определения с помощью них расстояний между объектами для выполнения классификационных или диагностических процедур, сравнения объектов или процессов.

Простейший способ создать метрику — это использовать шаблон метрики. Шаблон метрики позволяет создавать определенные типы метрик. Можно использовать функции

группирования (например, сумму и среднее значение) и другие функции (например, ранг и NTile). Для этого следует использовать редактор функций любой электронной таблицы, который окажет помощь в течение процесса или введя формулу метрики. Для этого необходимо использовать редактор формул, который также позволяет создавать составные метрики. (объединяющие несколько метрик).

### **Виды метрик и шкал, используемых при оценке:**

1. *Категорийные* – характеризуются номинальной шкалой. Характеризуют только наличие или отсутствие свойства у ПП без численной градации

2. *Ранжирующие* – характеризуются порядковой шкалой. Позволяют упорядочивать свойства программ путем сравнения с опорными значениями. Абсолютные – на сколько свойство больше. Относительные – во сколько раз свойство больше

3. *Числовые* – характеризуются интервальной шкалой. Представляются реально измеряемыми физическими величинами

При измерениях характеристик объекта в определенных метриках базируются на основных понятиях **теории измерений**.

В процессе принятия решений ЛПР и эксперты формируют ситуации, цели, ограничения, варианты решений и производят измерение их характеристик. Эти измерения могут носить качественный или количественный характер и быть *объективными* или *субъективными*.

**Объективные измерения** производятся измерительными приборами, действие которых основано на использовании физических законов. Теория объективных измерений достаточно хорошо разработана.

**Субъективные измерения** производятся человеком, который выполняет как бы роль измерительного прибора. Естественно, что при субъективном измерении на его результаты влияет психология мышления человека.

На основе использования логики и теории отношений построена *теория измерений*, позволяющая с единых позиций рассматривать как объективные, так и субъективные измерения.

**Измерение** определяется как процедура сравнения объектов по определенным показателям (признакам). В это определение включены три понятия: *объекты, показатели и процедура сравнения.*

**Объектами** могут быть предметы, явления, события, решения и т.п.

В качестве **показателей сравнения** объектов используются пространственные, временные, физические, физиологические, социологические, психологические и другие свойства и характеристики объектов.

**Процедура сравнения** включает определение *отношений* между объектами и *способ их сравнения*. Введение конкретных показателей сравнения позволяет установить отношения между объектами, например: «больше», «меньше», «равны», «хуже», «предпочтительнее» и т.д. **Существуют различные способы сравнения объектов между собой**, например, последовательно с одним объектом, принимаемым за эталон, или друг с другом в некоторой последовательности.

Для формального описания множества объектов и отношений между ними при фиксированных показателях сравнения вводится понятие **эмпирической системы**.

$$M = \langle X, R \rangle,$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  – множество объектов, в качестве которых могут рассматриваться, например, ситуация, цели, решения и т.п.;  $R = (R_1, R_2, \dots, R_s)$  – множество отношений между объектами.

**Отношение** является самой общей формой описания связей между объектами. **Частным случаем отношения является функция**. Запись вида  $x_i R_k x_j$  или  $(x_i x_j) \in R_k$

означает, что **объекты  $x_i$  и  $x_j$  находятся между собой в отношении  $R_k$** . Такое отношение называется **бинарным (двухместным)**, поскольку оно связывает между собой два объекта. Если отношение имеет место одновременно между тремя объектами, то оно называется **тернарным (трехместным)**.

**Рассмотрим** основные свойства бинарных отношений, наличие которых позволяет выделить классы отношений, широко используемых при описании взаимосвязей объектов в задаче ПР. Будем рассматривать объекты  $x_i$  из множества  $X$  и некоторое бинарное отношение  $R$ . Если все объекты из множества  $X$  сравнимы между собой по этому отношению, то говорят, что отношение  $R$  является **полным (совершенным, линейным)**. Если не все объекты сравнимы по отношению  $R$ , то оно называется **неполным (несовершенным, нелинейным, частичным)**.

**Полное и неполное отношение  $R$  может иметь следующие свойства:**

- **рефлексивность**  $x_i R x_i$ , т.е. это свойство означает, что объект находится в отношении  $R$  к самому себе;

- **антирефлексивность** – из  $x_i R x_j$  следует, что  $x_i \neq x_j$ , т.е. свойство антирефлексивности может выполняться только для несовпадающих объектов;

- **симметричность** – если  $x_i R x_j$ , то и  $x_j R x_i$ , т.е. отношение симметрично к обоим объектам;

- **антисимметричность** – если одновременно  $x_i R x_j$  и  $x_j R x_i$ , то это означает, что  $x_i = x_j$ ;

- **транзитивность** – если  $x_i R x_j$  и  $x_j R x_k$ , то  $x_i R x_k$ .

Используя перечисленные свойства, определим отношения **эквивалентности, строгого порядка и нестрогого порядка**.

Наличие свойств непосредственно является признаком для определения типа отношения.

В основе оценки лежит процесс сопоставления значений качественных или количественных характеристик исследуемой системы значениям соответствующих шкал. Тип шкалы определяется свойствами допустимого преобразования  $\Phi$ .

К наиболее употребимым в практике измерений типам шкал относятся: **наименований; порядковая; интервалов; отношений; разностей; абсолютная.**



### Шкала порядка

Шкала называется **ранговой (шкала порядка)**, если множество допустимых преобразований состоит из всех монотонно возрастающих допустимых преобразований шкальных значений. Следовательно, шкала порядка единственна с точностью до монотонного преобразования. Монотонно возрастающим называется такое преобразование  $\varphi(x)$ , которое удовлетворяет условию: если  $x_1 > x_2$ , то и  $\varphi(x_1) > \varphi(x_2)$  для любых шкальных значений  $x_1, x_2$  из области определения  $\varphi(x)$ . Порядковый тип шкал допускает не только различие объектов, как номинальный тип, но и используется для упорядочения объектов по измеряемым свойствам. Числа в шкале определяют порядок следования объектов и не дают возможности сказать, на сколько или во сколько раз один объект предпочтительнее другого. В этой шкале также отсутствуют понятия масштаба и начала отсчета.

**Измерение в шкале порядка может применяться, например, в следующих ситуациях:**

- необходимо упорядочить объекты во времени или пространстве. Это ситуация, когда интересуются не сравнением степени выраженности какого-либо их качества, а лишь взаимным пространственным или временным расположением этих объектов;
- нужно упорядочить объекты в соответствии с каким-либо качеством, но при этом не требуется производить его точное измерение;
- какое-либо качество в принципе измеримо, но в настоящий момент не может быть измерено по причинам практического или теоретического характера.

Примером шкалы порядка может служить шкала твердости минералов, предложенная в 1811 г. немецким ученым Ф. Моосом и до сих пор распространенная в полевой геологической работе. Другими примерами шкал порядка могут служить шкалы силы ветра, силы землетрясения, сортности товаров в торговле, различные социологические шкалы и т.п.

Любая шкала, полученная из шкалы порядка с помощью произвольного монотонно возрастающего преобразования шкальных значений, будет также точной шкалой порядка для исходной эмпирической системы с отношениями.

Несколько более «сильными», чем порядковые шкалы, являются **шкалы гиперпорядка**. Допустимыми для этих шкал являются гипермонотонные преобразования, т.е. преобразования  $\varphi(x)$ , такие, что для любых  $x_1, x_2, x_3, x_4$  :  
 $\varphi(x_1) \varphi(x_2) < \varphi(x_3) \varphi(x_4)$

только когда  $x_1, x_2, x_3, x_4$  принадлежат области определения и  $x_1 - x_2 < x_3 - x_4$ .

Таким образом, при измерении в шкалах гиперпорядка сохраняется упорядочение разностей численных оценок.

### **Шкала интервалов**

**Шкала интервалов** применяется для отображения величины различия между свойствами объектов. Примером использования этой шкалы является измерение температуры в градусах Фаренгейта или Цельсия. При экспертном оценивании шкала интервалов применяется для оценки полезности объектов. Основным свойством шкалы интервалов является равенство интервалов. Интервальная шкала может иметь произвольные точки отсчета и масштаб. Следовательно, шкала интервалов единственна с точностью до линейного преобразования. В этой шкале отношение разности чисел в двух числовых системах определяется масштабом измерения.

Одним из наиболее важных типов шкал является **тип интервалов**. Тип шкал интервалов содержит шкалы, единственные с точностью до множества положительных линейных допустимых преобразований вида  $\varphi(x) = ax + b$ , где  $a > 0$ ;  $b$  –любое значение. Основным свойством этих шкал является сохранение неизменными отношений интервалов в эквивалентных шкалах:

$$\frac{x_1 - x_2}{x_3 - x_4} = \frac{\varphi(x_1) - \varphi(x_2)}{\varphi(x_3) - \varphi(x_4)} = const.$$

Отсюда и происходит название данного типа шкал. Примером шкал интервалов могут служить шкалы температур. В этом случае функция допустимого преобразования градусов по шкале Цельсия в градусы по шкале Фаренгейта имеет вид

$c_1 = \varphi(c'_1) = \frac{9}{5}c'_1 + 32$ , и наоборот, функция допустимого преобразования градусов по шкале Фаренгейта в градусы по шкале Цельсия имеет вид

$$c'_1 = \varphi(c_1) = \frac{5}{9}(c_1 - 32)$$

Другим примером измерения в интервальной шкале может служить признак «дата совершения события», поскольку для измерения времени в конкретной шкале необходимо фиксировать масштаб и начало отсчета. Григорианский и мусульманский календари две конкретизации шкал интервалов.

Таким образом, при переходе к эквивалентным шкалам с помощью линейных преобразований в шкалах интервалов происходит изменение как начала отсчета (параметр  $b$ ), так и масштаба измерений (параметр  $a$ ).

Шкалы интервалов так же, как номинальная и порядковая, сохраняют различие и упорядочение измеряемых объектов. Однако кроме этого они сохраняют и отношение расстояний

между парами объектов. Запись  $\frac{x_1 - x_2}{x_3 - x_4} = K$  означает, что расстояние между  $x_1$  и  $x_2$  в  $K$  раз больше расстояния между  $x_3$  и  $x_4$  и в любой эквивалентной шкале это значение (отношение разностей численных оценок) сохранится. При этом отношения самих оценок не сохраняются.

В социологических и медико-биологических исследованиях в шкалах интервалов обычно измеряют временные и пространственные характеристики объектов. Например, даты событий, стаж, возраст, время выполнения заданий, разницу в отметках на графической шкале и т.д. Однако прямое отождествление замеренных переменных с изучаемым свойством не столь просто.

В качестве другого примера рассмотрим испытание умственных способностей, при котором измеряется время, требуемое для решения какой-нибудь задачи. Хотя физическое время измеряется в шкале интервалов, время, используемое как мера умственных способностей, принадлежит шкале порядка. Для того чтобы построить более совершенную шкалу, необходимо исследовать более богатую структуру этого свойства.

**Типичная ошибка:** свойства, измеряемые в шкале интервалов, принимаются в качестве показателей для других свойств, монотонно связанных с данными. Применяемые для измерения связанных свойств исходные шкалы интервалов становятся всего лишь шкалами порядка. Игнорирование этого факта часто приводит к неверным результатам.

Наиболее широко при проведении социологических измерений применяются следующие два типа интервальной шкалы.

На основе **шкалы Лайкерта** изучается степень согласия или несогласия респондентов с определенными высказываниями. Эта шкала носит симметричный характер и измеряет интенсивность чувств респондентов. Например, содержит следующие градации: совершенно согласен (1); в какой-то мере согласен (2); отношусь нейтрально (3); в какой-то мере не согласен (4); совершенно не согласен (5). В скобках указаны баллы, приписываемые ответам на вопросы анкеты, содержащимся в определенных градациях.

С помощью шкалы Лайкерта может быть изучено мнение (отношение) сотрудников какой-то организации к различным управленческим аспектам: системе мотивации труда, психологическому климату в коллективе, к политике нововведений и др.

Существуют различные варианты модификации шкалы Лайкерта, например, вводится различное число градаций (5—9).

**Семантическая дифференциальная шкала** (семантический дифференции) содержит серию двухполярных определений, характеризующих различные свойства изучаемого объекта. Данная шкала была разработана американским ученым

Ч.Осгудом для измерения смысла понятий и слов, и прежде всего для дифференциации эмоциональной стороны объекта измерения при изучении социальных установок. Таким путем определялась реакция человека в отношении изучаемого объекта.

Например, при оценке морального климата в коллективе при разработке анкеты вначале выбираются характеризующие его показатели (отношения между сотрудниками, отношения между руководителями, отношения между руководителями и подчиненными и др.). Затем для каждого показателя (вопроса анкеты) составляется шкала, представляющая собой континуум образованный парой антонимичных прилагательных. Континуум содержит семь градаций интенсивности отношений. Например, по вопросу, характеризующему отношения между сотрудниками, шкала имеет следующие градации:

- очень хорошие (+3);
- хорошие (+2);
- скорее хорошие (+1);
- ни хорошие, ни плохие (0)
- скорее плохие (-1);
- плохие (-2);
- очень плохие (-3).

Каждый респондент выражает свое отношение к изучаемой проблеме по всему набору шкал. Данный тип шкалы также часто используется при определении имиджа торговой марки, магазина и т.п.

**Шкала отношений. Шкалой отношений (подобия)** называется шкала, если множество допустимых преобразований состоит из преобразований подобия

$$\varphi(x) = ax$$

Где  $a > 0$  – действительные числа. Нетрудно убедиться, что в шкалах отношений остаются неизменными отношения численных оценок объектов. Действительно, пусть в одной шкале объектам  $a_1$  и  $a_2$  соответствуют шкальные значения  $x_1$  и  $x_2$ , а в другой  $\varphi(x_1) = ax_1$  и  $\varphi(x_2) = ax_2$ . Тогда имеем:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{\varphi(x_1)}{\varphi(x_2)} = \frac{ax_1}{ax_2}$$

Данное соотношение объясняет название шкал отношений. Примерами измерений в шкалах отношений являются измерения массы и длины объектов. Известно, что при установлении массы используется большое разнообразие численных оценок. Так, производя измерение в килограммах, получаем одно численное значение, при измерении в фунтах - другое и т.д. Однако можно заметить, что в какой бы системе единиц ни производилось измерение массы, отношение масс любых объектов одинаково и при переходе от одной числовой системы к другой, эквивалентной, не меняется. Этим же свойством обладает и измерение расстояний и длин предметов.

Как видно из рассмотренных примеров, шкалы отношений отражают отношения свойств объектов, т.е. во сколько раз свойство одного объекта превосходит это же свойство другого объекта.

Шкалы отношений образуют подмножество шкал интервалов фиксированием нулевого значения параметра  $b : b = 0$ . Такая фиксация означает задание нулевой точки начала отсчета шкальных значений для всех шкал отношений. Переход от одной шкалы отношений к другой, эквивалентной ей шкале осуществляется с помощью преобразований подобия (растяжения), т.е. изменением масштаба измерений. Шкалы отношений, являясь частным случаем шкал интервалов, при выборе нулевой точки отсчета сохраняют не только отношения свойств объектов, но и отношения расстояний между парами объектов.

**Шкала разностей. Шкалы разностей** определяются как шкалы, единственные с точностью до преобразований сдвига

$\varphi(x) = x + b$ ,  $b$  – действительные числа. Это означает, что при переходе от одной числовой системы к другой меняется лишь начало отсчета. Шкалы разностей применяются в тех случаях, когда необходимо измерить, насколько один объект превосходит

по определенному свойству другой объект. В шкалах разностей неизменными остаются разности численных оценок свойств. Действительно, если  $x_1$  и  $x_2$  - оценки объектов  $a_1$  и  $a_2$  в одной шкале, а  $\varphi(x_1) = x_1 + b$  и  $\varphi(x_2) = x_2 + b$  - в другой шкале, то имеем:

$$\varphi(x_1) - \varphi(x_2) = x_1 + b - x_2 + b = x_1 - x_2$$

Примерами измерений в шкалах разностей могут служить измерения прироста продукции предприятий (в абсолютных единицах) в текущем году по сравнению с прошлым, увеличение численности учреждений, количество приобретенной техники за год и т.д.

Другим примером измерения в шкале разностей является летоисчисление (в годах). Переход от одного летоисчисления к другому осуществляется изменением начала отсчета.

Как и шкалы отношений, шкалы разностей являются частным случаем шкал интервалов, получаемых фиксированием параметра  $a$  ( $a=1$ ), т.е. выбором единицы масштаба измерений.

Точка отсчета в шкалах разностей может быть произвольной. Шкалы разностей, как и шкалы интервалов, сохраняют отношения интервалов между оценками пар объектов, но, в отличие от шкалы отношений, не сохраняют отношения оценок свойств объектов.

**Абсолютная шкала.** Абсолютная шкала – в которых единственными допустимыми преобразованиями являются тождественные преобразования:  $\varphi(x) = x$ . Это означает, что существует только одно отображение эмпирических объектов в числовую систему. Отсюда и название шкалы, так как для нее единственность измерения понимается в буквальном абсолютном смысле.

Абсолютные шкалы применяются, например, для измерения количества объектов, предметов, событий, решений и т.п. В качестве шкальных значений при измерении количества объектов используются натуральные числа, когда объекты представлены целыми единицами, и действительные числа, если кроме целых единиц присутствуют и части объектов.



Абсолютные шкалы являются частным случаем всех ранее рассмотренных типов шкал, поэтому сохраняют любые соотношения между числами оценками измеряемых свойств объектов: различие, порядок, отношение интервалов, отношение и разность значений и т.д.

Кроме указанных существуют промежуточные типы шкал, такие, например, как степенная шкала  $\varphi(x) = ax^b$  ( $a > 0, b > 0, a \neq 1, b \neq 1$ ) и ее разновидность логарифмическая шкала  $\varphi(x) = x^b$  ( $b > 0, b \neq 1$ ). На рисунке 1 представлено соотношение между основными типами шкал в виде иерархической структуры основных шкал.

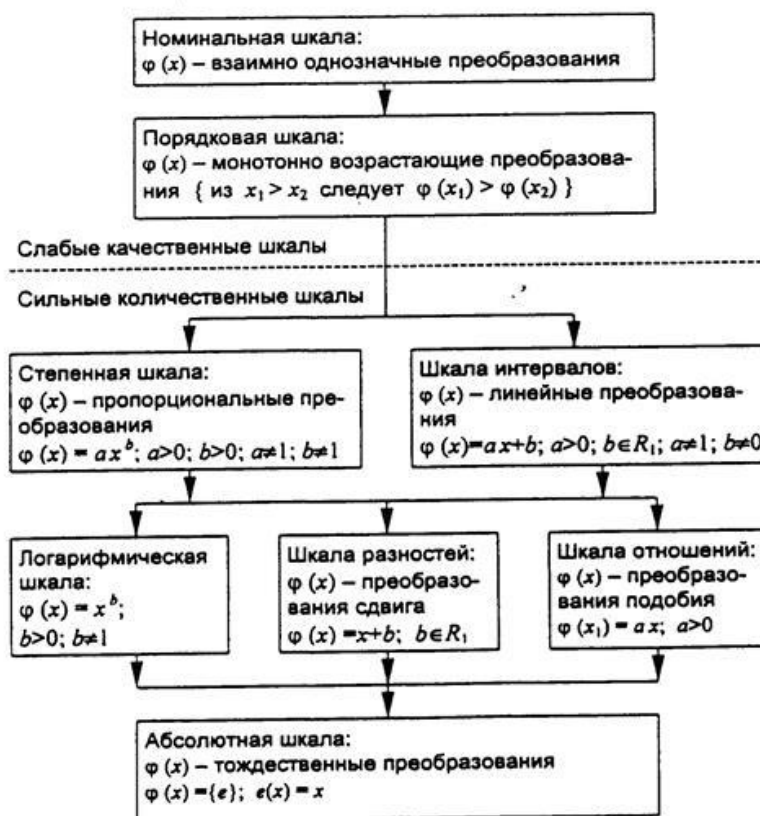


Рисунок 1. Иерархическая структура основных шкал

Здесь стрелки указывают включение совокупностей допустимых преобразований более «сильных» в менее «сильные» типы шкал. При этом шкала тем «сильнее», чем меньше свободы



в выборе  $\varphi(x)$ . Некоторые шкалы являются **изоморфными**, т.е. **равносильными**. Например, равносильны шкала интервалов и степенная шкала. Логарифмическая шкала равносильна шкале разностей и шкале отношений.

**Шкалы наименований и порядка** являются **качественными** шкалами. В шкале наименований описывается различие или эквивалентность объектов, а в шкале порядка – качественное превосходство, отличие объектов. В этих шкалах нет понятия начала отсчета и масштаба измерения.

**Шкалы интервалов, отношений, разностей и абсолютная шкала** являются **количественными** шкалами. В этих шкалах существуют понятия начала отсчета и масштаба, которые выбираются произвольно. Количественные шкалы позволяют измерить, на сколько (шкалы интервалов и разностей) или во сколько (шкалы отношений и абсолютная) раз один объект отличается от другого по выбранному показателю.

Выбор той или иной шкалы для измерения определяется характером отношений между объектами эмпирической системы, наличием информации об этих отношениях и целями принятия решения. Применение количественных шкал требует значительно более полной информации об объектах по сравнению с применением качественных шкал.

Следует обратить внимание на правильное согласование выбираемой шкалы измерения с целями решения. Например, если целью решения является упорядочение объектов, то нет необходимости измерять количественные характеристики объектов, достаточно определить только качественные характеристики. Типичным примером такого решения является подведение определению наилучших предприятий. Для решения этой задачи, как правило, не требуется определять, на сколько или во сколько раз один объект лучше другого, т.е. нет необходимости при таком измерении пользоваться количественными шкалами.

Пример балльной оценки свойств систем

Свойство системы	Система А		Система Б	
	истинная	в баллах	истинная	в баллах
$y_1$	4,4	4	3,6	4
$y_2$	3,3	3	3,7	4
$y_3$	2,4	2	2,6	3
$y_4$	4,4	4	2,6	3
Суммарная оценка	14,5	13	12,5	14

По фактическому качеству лучшей является система А, а по результатам экспертизы – Б.

**Таким образом, способы измерения и обработки результатов оказывают существенное влияние на результаты.**

Избежать ошибок можно, используя результаты, полученные в теории шкалирования, они определяют правила и перечень допустимых операций осреднения характеристик. **Остановимся подробнее на правилах осреднения.**

Проводить осреднение допускается только для однородных характеристик, измеренных в одной шкале. Это означает, например, что не имеет физического смысла вычисление среднего значения скорости для мобильного абонентского пункта, если слагаемыми являются скорость передачи данных и скорость перемещения этого объекта. Иными словами, осредняются только такие значения  $y_i$ , которые представляют собой или оценки различных измерений одной и той же характеристики, или оценки нескольких различных однородных характеристик.

Каждое значение показателя  $y_i, i = \overline{1, n}$  может иметь для исследователя различную ценность, которую учитывают с помощью коэффициентов значимости  $k_i$  причем  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ .

### **Методы измерений**

**Существуют прямые и косвенные процедуры измерения.** В первом случае проводится непосредственное прямое оценивание измеряемого объекта (свойства). Во втором случае оценка приписывается по измеряемому признаку на основе совокупности косвенных ответов.

При использовании **прямого измерения** некоторым индивидуумом осуществляется непосредственная оценка какого-то признака путем, как правило, выбора одного числового балла из некоторой совокупности чисел или путем выбора одного ответа из серии предложенных. В данном случае часто обращаются к респондентам с закрытыми вопросами типа: «Как часто Вы читаете какой-то специализированный журнал?» Вариантами ответов могут быть: «постоянно», «довольно часто», «редко», «никогда». Ответам могут быть приписаны числовые оценки (баллы), например соответственно 4, 3, 2, 1.

Для оценки измеряемого качества иногда пользуются графическими шкалами, разделенными на равные части и снабженными словесными или числовыми обозначениями. Респондента просят сделать отметку на шкале в соответствии с его оценкой данного качества.

Непосредственные оценки рассмотренного типа производятся в шкале интервалов. В шкале отношений производятся непосредственные измерения, например, возраста или показателей, основанных на денежных единицах.

**К наиболее употребительным методам субъективных измерений относятся:**

- ранжирование,
- парное сравнение,
- непосредственная оценка;
- последовательное сравнение.

При описании каждого из перечисленных методов будет предполагаться, что имеется конечное число измеряемых объектов  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  и сформулирован один или несколько признаков сравнения, по которым осуществляется сравнение свойств объектов. Следовательно, методы измерения будут различаться лишь процедурой сравнения объектов. Процедура сравнения включает:

- 1) построение отношений между объектами эмпирической системы;
- 2) выбор отображающей функции  $f$ ;
- 3) определение типа шкалы измерений.

**Ранжирование** представляет собой процедуру упорядочения объектов, выполняемую ЛПР или экспертом.

На основе знаний и опыта ЛПР или эксперт располагает объекты в порядке предпочтения, руководствуясь одним или несколькими выбранными показателями сравнения.

В зависимости от вида отношений между объектами возможны различные варианты упорядочения объектов. Рассмотрим эти варианты. Пусть среди объектов нет одинаковых по сравниваемым показателям, т.е. нет эквивалентных объектов. В этом случае между объектами существует только отношение строгого порядка. В результате сравнения всех объектов по отношению строгого порядка составляется упорядоченная последовательность

$x_1 \succ x_2 \succ \dots \succ x_m$ , где объект с первым номером является наиболее предпочтительным из всех объектов, объект со вторым номером менее предпочтителен первому объекту, но предпочтительнее всех остальных объектов, и т. д.

Полученная система объектов с отношением строгого порядка при условии сравнимости всех объектов по этому отношению образует полный строгий порядок. Для этого отношения доказано существование числовой системы, элементами которой являются действительные числа, связанные между собой отношением неравенства. Это означает, что упорядочению объектов соответствует упорядочение чисел

$$c_1 > c_2 > \dots > c_m ,$$

где  $c_i = f(x_i)$  .

Возможна и обратная последовательность

$$c_1 < c_2 < \dots < c_m ,$$

в которой наиболее предпочтительному объекту приписывается наименьшее число и по мере убывания предпочтения объектам приписываются большие числа.

Единственным ограничением является монотонность преобразования. Следовательно, допустимое преобразование при переходе, от одного числового представления к другому должно обладать свойством монотонности. Но таким свойством допустимого преобразования обладает шкала порядков, поэтому **ранжирование объектов есть измерение в порядковой шкале**. В практике ранжирования чаще всего применяется числовое представление последовательности в виде натуральных чисел

$$c_1 = f(x_1) = 1 , c_2 = f(x_2) = 2 , \dots , c_m = f(x_m) = m .$$

Числа  $c_1 , c_2 , \dots , c_m$  называются рангами и обычно обозначаются буквами  $r_1 , r_2 , \dots , r_m$  . Возможно при ранжировании получить упорядочение, соответствующее отношению нестрогого порядка

$$x_1 \succ x_2 \succ x_3 \approx x_4 \approx x_5 \succ x_6 \succ x_7 \succ x_8 \succ x_9 \approx x_{10} \quad (3.4)$$

Для эквивалентных объектов удобно с точки зрения технологии последующей обработки оценок назначать одинаковые ранги, равные среднему арифметическому значению рангов, присваиваемых одинаковым объектам. Такие ранги называют **связанными**. Например, для

$$r_3 = r_4 = r_5 = \frac{(3 + 4 + 5)}{3} = 4 \quad \text{и} \quad r_9 = r_{10} = \frac{(9 + 10)}{2} = 9,5 .$$

Напомним, что ранги объектов определяют только порядок расположения объектов. Ранги как числа не дают возможности сделать вывод о том, на сколько или во сколько раз предпочтительнее один объект по сравнению с другим. Если, например, ранг объекта равен трем, то отсюда не следует делать

вывод о том, что объект, имеющий ранг, равный единице, в три раза предпочтительнее, чем объект, имеющий ранг, равный трем.

**Достоинством ранжирования** как метода субъективного измерения является простота осуществления процедур, не требующая какого-либо трудоемкого обучения экспертов.

**Недостатком ранжирования** является практическая невозможность упорядочения большого числа объектов. Как показывает опыт, при числе объектов, большем 15–20 эксперты затрудняются в построении ранжировки. Это объясняется тем, что в процессе ранжирования эксперт должен установить взаимосвязь между всеми объектами, рассматривая их как единую совокупность. При увеличении числа объектов количество связей между ними растет пропорционально квадрату числа объектов. Сохранение в памяти и анализ большой совокупности взаимосвязей между объектами ограничиваются психологическими возможностями человека. Поэтому при ранжировании большого числа объектов эксперты могут допускать существенные ошибки

**Парное сравнение** представляет собой процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных их пар. По сравнению с ранжированием парное сравнение представляет собой более простую задачу. При сравнении пары объектов возможно либо отношение строгого порядка, либо отношение эквивалентности. Отсюда следует, что парное сравнение есть измерение в порядковой шкале. В практике парного сравнения используются следующие числовые представления:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \succcurlyeq x_j \\ 0, & \text{если } x_i \prec x_j \end{cases} \quad (i, j = \overline{1, m})$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{если } x_i \succ x_j \\ 1, & \text{если } x_i \sim x_j \\ 0, & \text{если } x_i \prec x_j \end{cases} \quad (i, j = \overline{1, m}).$$

В матрице  $C$  на диагонали всегда будут располагаться 1, т.к. объект всегда эквивалентен себе.

### **Проверка правильности шкалы.**

· *отсутствие разброса ответов по значениям шкалы.* Попадание ответов в один пункт свидетельствует о полной непригодности измерительного инструмента — шкалы. Такая ситуация может возникнуть или из-за «нормативного» давления в сторону общепринятого мнения, или из-за того, что градации (значения) шкалы не имеют отношения к распределению данного свойства у рассматриваемых объектов (нерелевантны).

Например, при опросе все ответы концентрируются в позитивном или только в негативном конце шкалы. Конечно, это может быть и результатом единодушия оценок, но может быть и результатом того, что сама шкала неудачна, например, содержит какой-то пункт, сформулированный с сильным нормативным давлением на опрашиваемых. Допустим, задан вопрос об употреблении алкоголя и крайне негативный вариант ответа звучит так: «Я пью систематически и обычно до бесчувственного состояния». Сомнительно, чтобы даже заведомый алкоголик отметил такой пункт как показатель своего отношения к спиртному. Скорее всего, он выберет суждение с менее неприятным оттенком, например: «Я выпиваю довольно часто». Крайне отрицательный пункт шкалы здесь «не работает», он отпугивает. Вследствие этого шкала спроектирована неправильно.

Другой пример. Если все опрашиваемые респонденты согласны с утверждением: «хорошо, когда используется эффективная система мотивации труда», нет ни одного ответа «не согласен», то подобная шкала не поможет дифференцировать отношение респондентов к разным методам мотивации труда.

· *использование части шкалы.* Довольно часто обнаруживается, что практически работает лишь какая-то часть шкалы, какой-то один из ее полюсов с прилегающей более или менее обширной зоной. Так, если респондентам для оценки предлагается шкала, имеющая положительный и отрицательный полюса, в частности от +3 до —3, то при оценивании какой-то заведомо положительной ситуации респонденты не используют

отрицательные оценки, а дифференцируют свое мнение лишь с помощью положительных.

*· неравномерное использование отдельных пунктов шкалы.* Случается, что некоторое значение признака систематически выпадает из поля зрения респондентов, хотя соседние градации, характеризующие более низкую и более высокую степень выраженности признака, имеют существенное наполнение.

Так, если конфигурация распределения ответов на вопрос с четырьмя упорядоченными градациями такая, как на рисунке 2, градации данной шкалы, видимо, неудачно сформулированы. Значительное наполнение двух соседних по отношению к пункту 2 пунктов (1 и 3) свидетельствует о «захвате» части голосов из плохо сформулированного пункта 2.

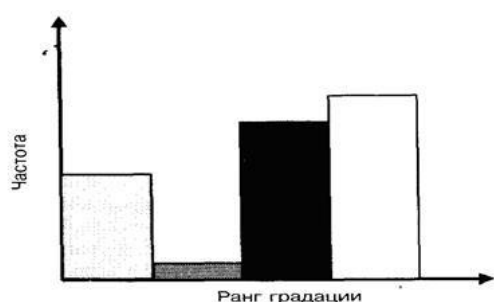


Рисунок 2. Пример неравномерного распределения ответов по шкале

Аналогичная картина наблюдается и в том случае, когда респонденту предлагают шкалу, имеющую слишком большую дробность: будучи не в состоянии оперировать всеми градациями шкалы, респондент выбирает лишь несколько базовых. Например, зачастую десятибалльную шкалу респонденты расценивают как некоторую модификацию пятибалльной, предполагая, что «десять» соответствует «пяти», «восемь» — «четырем», «пять» — «трем» и т.д. При этом базовые оценки используются значительно чаще, чем другие.

В процессе измерения иногда возникают **грубые ошибки**, причиной которых могут быть неправильные записи исходных данных, плохие расчеты, неквалифицированное использование



измерительных средств и т. п. Это проявляется в том, что в рядах измерений попадают данные, резко отличающиеся от совокупности всех остальных значений. Чтобы выяснить, нужно ли эти значения признать грубыми ошибками, устанавливают критическую границу так, чтобы вероятность того, что крайние значения превысят ее, была бы достаточно малой и соответствовала бы некоторому уровню значимости  $\alpha$ . Это правило основано на том, что появление в ответах чрезмерно больших значений хотя и возможно, как следствие естественной variability значений, но маловероятно.

Тип отношения	Свойства				
	антирефлексивность	симметричность	антисимметричность	транзитивность	
рефлексивность					
Эквивалентность	+		+		+
Строгий порядок		+			+
Нестрогий порядок	+			+	+

**Отношение эквивалентности** называется рефлексивное симметричное и транзитивное отношение и содержательно интерпретируется как взаимозаменяемость, одинаковость объектов. Для обозначения отношения эквивалентности используется специальный символ « $\sim$ ». Запись  $x_i \sim x_j$  означает эквивалентность объектов. Отношение эквивалентности порождает разбиение множества объектов на **классы**. В каждый класс попадают эквивалентные, т.е. неразличимые по показателю (или группе показателей), объекты.

**Отношение строгого порядка** является антирефлексивным и транзитивным отношением и может интерпретироваться как предпочтительность в широком смысле одного объекта по сравнению с другим объектом, например «важнее», «лучше», «выше», «больше» и т. п. Для обозначения отношения строгого порядка используется специальный символ « $\succ$ », например если объект  $x_i$  строго предпочтительнее объекта  $x_j$ , то это

записывается в виде  $x_i > x_j$ . Отношение полного строгого порядка порождает строгое упорядочение объектов по предпочтительности.

**Отношение нестрогого порядка** есть объединение отношений строгого порядка и эквивалентности и обладает **свойствами рефлексивности, антисимметричности и транзитивности**. В соответствии с этим для обозначения этого отношения применяется символ « $\geq$ ». Запись  $x_i \geq x_j$  означает, что объект  $x_i$  либо строго предпочтительнее, либо эквивалентен объекту  $x_j$ ; другими словами, эта запись интерпретируется как непредпочтительность объекта  $x_j$  по сравнению с объектом  $x_i$ ; или, например, что объект  $x_i$  не хуже объекта  $x_j$ . Отношение полного нестрогого порядка порождает строгое упорядочение классов эквивалентных объектов.

Разнообразие возможных объектов, показателей сравнения и видов отношений, встречающихся в реальных измерениях, привело к необходимости установления **универсальной системы с отношениями**. В качестве такой системы используется числовая система

$$N = \langle C, S \rangle,$$

где  $C$  – множество действительных чисел;  $S = (S_1, S_2, \dots, S_s)$  – множество отношений между числами.

Числовая система называется **полной**, если  $C$  есть множество всех действительных чисел. Отношениям строгого и нестрогого порядка между объектами соответствуют отношения **строгого и нестрогого неравенства** между числами.

Числовая система используется для *унификации* процесса измерения. **Измерение** заключается в отображении объектов эмпирической системы на множество чисел таким образом, чтобы отношения между числами, отображающими объекты, сохраняли отношения между самими объектами. Для того чтобы числовая система сохраняла свойства и отношения объектов, необходимо, чтобы она была *изоморфной* или по крайней

мере *гомоморфной* эмпирической системе. Числовая система **изоморфна** эмпирической системе, если они подобны и между ними существует *взаимно однозначное* отображение (функция)  $f$  объектов на множество чисел, такое, что отношение  $R$  между объектами имеет место тогда и только тогда, когда имеет место отношение между числами, отображающими объекты на числовой оси. **Подобие** двух систем с отношениями означает, что количество отношений и их местность в обеих системах одинаково.

Условие взаимной однозначности отображения  $f$  является в ряде случаев слишком жестким и не всегда необходимым. Если устранить это условие из предыдущего определения изоморфизма, то приходим к понятию **гомоморфизма**.

Таким образом, *измерение представляет собой отображение объектов эмпирической системы на множество чисел в числовой системе*. Схематически это представляется следующим образом

$$\begin{array}{c} M = \langle X, R \rangle \\ \downarrow f \\ N = \langle C, S \rangle \end{array}$$

С помощью отображения (функции)  $f$  каждому объекту эмпирической системы приписывается число  $c_i = f(x_i)$ . При таком отображении отношения между числами должны сохранять отношения между объектами, т.е. если  $x_i \geq x_j$ , то  $c_i = f(x_i) \geq c_j = f(x_j)$ .

**Основными проблемами теории измерений являются** проблемы *представления* и *единственности*.

**Проблема представления** заключается в доказательстве возможности представления эмпирической системы с помощью числовой системы, сохраняющей отношения между объектами, т.е. гомоморфной или изоморфной. В теории измерений доказано существование числовых систем для описания множества объектов, связанных отношениями эквивалентности, строгого и нестрогого порядков.

**Проблема единственности** заключается в определении всех возможных способов представления заданной эмпирической системы различными числовыми системами и установления связи между ними. Проблему единственности можно сформулировать как *проблему определения типа шкалы*.

Выбор той или иной шкалы для измерения определяется характером отношений между объектами эмпирической системы, наличием информации об этих отношениях и целями принятия решения. Применение количественных шкал требует значительно более полной информации об объектах по сравнению с применением качественных шкал.

Следует обратить внимание на правильное согласование выбираемой шкалы измерения с целями решения. Например, если целью решения является упорядочение объектов, то нет необходимости измерять количественные характеристики объектов, достаточно определить только качественные характеристики. Типичным примером такого решения является подведение определение наилучших предприятий. Для решения этой задачи, как правило, не требуется определять, на сколько или во сколько раз один объект лучше другого, т.е. нет необходимости при таком измерении пользоваться количественными шкалами.

Наименование	Формула
Средневзвешенное арифметическое (СВА)	$y_{сва} = \sum_{i=1}^n c_i y_i$
Среднеарифметическое (СА), частный случай СВА при равнозначности измерений ( $c_i = 1/n$ )	$y_{са} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$
Среднеквадратичное (СК)	$y_{ск} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$
Средневзвешенное геометрическое (СВГм)	$y_{свгм} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n y_i^{c_i}}$
Среднегеометрическое (СГм), частный случай СВГм при $c_i = 1/n$	$y_{сгм} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n y_i}$
Средневзвешенное гармоническое (СВГр)	$y_{свгр} = \left( \sum_{i=1}^n c_i y_i^{-1} \right)^{-1}$
Среднегармоническое (СГр)	$y_{сгр} = n \left( \sum_{i=1}^n y_i^{-1} \right)^{-1}$

Простая и взвешенные средние величины различаются не только по величине (не всегда), по способу вычисления, но и по своей роли в решении задач системного анализа. При этом *средневзвешенные* величины используются для сравнения систем с учетом вклада различных факторов в осредненную оценку.

Рассмотрим, например, среднее количество информации, получаемой из сети Интернет организацией, пользующейся услугами различных прикладных служб. Если эта средняя величина входит в систему показателей себестоимости, протоколов работы, типов используемых линий, то следует применять взвешенное среднее, так как произведение невзвешенного среднего на общую пропускную способность линий не даст количества полученной информации, поскольку служба электронной почты используется, например, значительно реже, чем WWW, и, следовательно, вносит меньший вклад в общее количество получаемой информации. Если же необходимо изучить связь количества получаемой информации с днем недели, то следует применять простое среднее количество информации за сутки, полностью абстрагируясь от различий между типами служб.

**Среднеарифметическое** используется в случаях, когда важно сравнить абсолютные значения какой-либо характеристики нескольких систем. Например, скорость вывода на печать текстов (лист/мин) для различных печатающих устройств.

Если при замене индивидуальных значений показателя на среднюю величину требуется сохранить неизменной сумму квадратов исходных величин (измерение вариации характеристики в совокупности), то в качестве средней следует использовать *среднеквадратичное*. Например, при определении местоположения источника радиоизлучения в радиоразведке вычисляется среднеквадратичное отклонение нескольких измерений.

**Среднегеометрическое**, в свою очередь, используется для определения относительной разности отдельных значений при необходимости сохранения произведения индивидуальных

величин тогда, когда среднее значение качественно одинаково удалено от максимального и минимального значений, т.е. когда важны не абсолютные значения, а относительный разброс характеристик. В статистике среднегеометрическое находит применение при определении средних темпов роста.

Например, если максимальная производительность процессора на операциях с данными целочисленного типа составляет для сжатия текстового файла миллион условных единиц, а для сжатия изображений графических объектов сто, то какую величину считать средней? Среднеарифметическое (500 000) качественно однородно с максимальным и резко отлично от минимального. Среднегеометрическое по логике дает верный ответ: 10 000. Не миллион, и не сотня, а нечто среднее.

**Среднегармоническое** используется, если необходимо, чтобы неизменной оставалась сумма величин, обратных индивидуальным значениям характеристик.

Пусть, например, в режиме обмена данными средняя скорость передачи данных по прямому каналу составляет 64 Кбайт/с, а средняя скорость по обратному каналу 2,4 Кбайт/с. Какова средняя скорость обмена данными? При замене индивидуальных значений скорости  $y_1 = 64$  и  $y_2 = 2,4$  на среднюю величину необходимо, чтобы неизменной величиной осталось время передачи в обе стороны, иначе средняя скорость может оказаться любой. Таким образом,  $v = 2(1/64 + 1/2,4)^{-1} \approx 4,8$  Кбайт/с.

Приведенные примеры показывают, что в каждом конкретном случае требуется четкое определение допустимых условий применения средних величин.

Соотношение между разными типами средних величин определяется правилом мажорантности средних  $СГр < СГм < СА < СК$ . Использование необоснованных способов определения средних величин может привести к искусственному завышению или занижению осредненного значения показателя качества системы.

Более устойчивой оценкой среднего является медиана (50-процентный квантиль), которая рекомендуется как основной показатель для шкал порядка, интервалов, разностей, отношений

и абсолютной. Математическое ожидание допустимо для шкал интервалов, разностей, отношений и абсолютных, но не столь устойчиво, как медиана. Применение математического ожидания для величин, измеренных в шкале порядка, является некорректным. Среднегеометрическое является единственно допустимым средним для степенных и логарифмических шкал, а также одним из допустимых для шкалы отношений. Для шкалы отношений допустимы также средневзвешенное арифметическое, среднегармоническое и среднеквадратичное.

Вопрос о применении средних в настоящее время исследован достаточно полно. Этого нельзя сказать о средневзвешенных. Однако для наиболее часто применяемого средневзвешенного арифметического доказан следующий факт. Средневзвешенное арифметическое, часто применяемое как обобщенный линейный критерий (аддитивная свертка при сведении векторной задачи к скалярной, при осреднении показателей и др.), допустимо использовать тогда и только тогда, когда значения частных показателей можно представить мультипликативным метризованным отношением линейного порядка или, другими словами, когда они измерены в шкале отношений. Доказано, что задача линейного программирования корректна, если коэффициенты ее целевой функции и ограничений измерены в шкале отношений.

Сводные данные по характеристикам разных шкал

Исходная эмпирическая система		Параметры, сохраняющиеся при переходе от одной шкалы к другой (из числа допустимых)	Допустимые виды осреднения		Рекомендуемые (да-нет), допустимые (+) и недопустимые (-) виды обработки случайных величин			
			Среднее	Другие	Средние	Разброс		
Отношение порядка	Шкала	Распределение по классам эквивалентности	Нет	Другие	M(x)	D(x)	Другие	Характеристики связи
Эквивалентность	Номинальная		Порядок	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Линейный порядок	Порядка	Порядок	Нет	Нет	Да	Нет	-	R(ξ, η)
То же, с мультипликативной метрикой	Интервал	Отношение разностей	Да	Нет	Да	Да	-	corr(ξ, η)
Линейный порядок	Линейный порядок	$\frac{\varphi(y_1) - \varphi(y_2)}{\varphi(y_3) - \varphi(y_4)} = \frac{y_1 - y_2}{y_3 - y_4}$	Нет	Среднегармоническое	-	-	-	-
Линейный порядок	Логарифмическая	Отношение разностей логарифмов	Нет	То же	-	-	-	-
То же	Отношений	$\frac{\ln \varphi(y_1) - \ln \varphi(y_2)}{\ln \varphi(y_3) - \ln \varphi(y_4)} = \frac{\ln y_1 - \ln y_2}{\ln y_3 - \ln y_4}$	Да	СВА СГМ СГР СК	Да	- +	-	-
То же, с аддитивной метрикой	Разностей	Отношение оценок	Да	-	Да	-	-	cov(ξ, η)
То же, на числовой оси целых чисел	Абсолютная	Разность оценок	Да	-	Да	- +	-	-
		Допустимых преобразований нет	Да	-	Да	+ +	-	-

Будущее развитие теории шкалирования и ее применения для нужд математического обеспечения ИС связаны с дальнейшим развитием понятия измерения. Одним из



направлений расширения понимания шкалы является привлечение понятий нечеткой и лингвистических переменных, используемых в теории нечетких множеств. Использование понятия функции принадлежности  $\mu \in [0,1]$ , используемой в этой теории, создает базу для введения более тонкой структуры измерения качественных характеристик и учета неопределенностей, свойственных сложным системам, на основе понятия нечеткой шкалы.

Например, пусть рассматриваемое нечеткое множество возраст людей. Нечеткими переменными (шкальными значениями), означающими возраст, являются лингвистические переменные «молодой», «средний», «старый» с приписанными им функциями принадлежности, которые можно определить так, как показано на рисунке 4. При этом 20-летний человек относится к нечеткому подмножеству возраста «молодой» с функцией принадлежности  $\mu_{\text{мол}} = 0,8$ , и он же с функцией принадлежности  $\mu_{\text{ср}} = 0,1$  относится к нечеткому подмножеству возраста средний (см. рис.3.7)

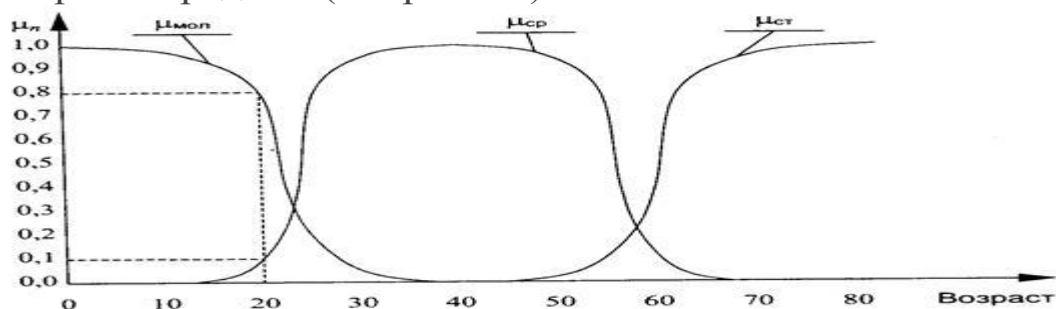


Рисунок 4. Пример нечеткой шкалы

**Непосредственная оценка** представляет собой процедуру приписывания объектам числовых значений в шкале интервалов. ЛПР или эксперту необходимо поставить в соответствие каждому объекту точку на определенном отрезке числовой оси. Естественно потребовать, чтобы эквивалентным объектам приписывались одинаковые числа. Удобно результат приписывания объектам чисел представить графически. На

рисунке 5 в качестве примера приведено такое представление для пяти объектов на отрезок числовой оси  $[0, 1]$ .

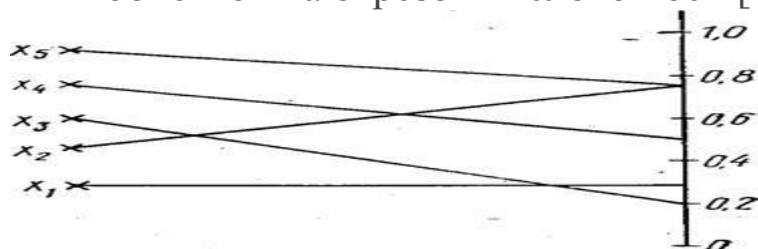


Рисунок 5. Непосредственная оценка объектов

Поскольку за начало отсчета выбрана нулевая точка, то в данном примере измерение производится в шкале отношений. ЛПР или эксперт соединяет каждый объект линией с точкой числовой оси. Измерения в шкале интервалов могут быть осуществлены с достаточной точностью при полной информированности ЛПР (экспертов) о свойствах объектов. Эти условия на практике встречаются редко, поэтому для измерения применяют балльную оценку. При этом вместо непрерывного отрезка числовой оси рассматривают участки, каждому из которых приписывается свой балл. Эксперт, приписывая объекту балл, тем самым измеряет его с точностью до определенного отрезка числовой оси. Применяются 5-, 10- и 100-балльные шкалы.

**Последовательное сравнение** представляет собой комплексную процедуру измерения, включающую как ранжирование, так и непосредственную оценку. При последовательном сравнении ЛПР (эксперт) выполняет следующие операции:

- осуществляет ранжирование объектов;
- производит непосредственную оценку объектов на отрезке  $[0,1]$ , полагая, что числовая оценка первого в ранжировке объекта равна единице, т.е.  $f(x_1)=1$  ;
- решает, будет ли первый объект превосходить по предпочтительности все остальные объекты вместе взятые. Если да, то эксперт увеличивает значение числовой оценки первого объекта так, чтобы она стала больше суммы числовых оценок

остальных объектов, т.е.  $f(x_1) > \sum_{i=2}^m x_i$ . В противном случае он изменяет величину  $f(x_1)$  так, чтобы она стала меньше, чем сумма оценок остальных объектов;

- решает, будет ли второй объект предпочтительнее, чем все последующие вместе взятые объекты, и изменяет  $f(x_2)$  так же, как это описано для  $f(x_1)$  в пункте 3);
- продолжает операцию сравнения предпочтительности последующих объектов и изменяет числовые оценки этих объектов в зависимости от своего решения о предпочтении.

Существует множество вариантов шкал, окончательный выбор обычно делается на основе испытания уровня надежности и точности измерений, проведенных с помощью различных вариантов шкал.

Необходимы процедуры для выявления присущих оценкам ошибок. Назовем это проблемой надежности измерения. Проблема надежности решается путем выявления правильности измерения, устойчивости и обоснованности.

При изучении правильности измерения устанавливается общая приемлемость данного способа измерения (шкалы или системы шкал). Непосредственно понятие правильности связано с возможностью учета в результате измерения различного рода систематических ошибок. Систематические ошибки имеют некоторую стабильную природу возникновения: либо они являются постоянными, либо меняются по определенному закону.

**Устойчивость** характеризует степень совпадения результатов измерения при повторных применениях измерительной процедуры и описывается величиной случайной ошибки. Она определяется постоянством подхода респондента к ответам на одинаковые или подобные вопросы.

Наиболее сложный вопрос надежности измерения – его **обоснованность**. Обоснованность связана с доказательством

того, что измерено вполне определенное заданное свойство объекта, а не некоторое другое, более или менее на него похожее.

При установлении надежности следует иметь **в виду, что в процессе измерения участвуют три составляющие:**

- 1) объект измерения,
- 2) измеряющие средства, с помощью которых производится отображение свойств объекта на числовую систему,
- 3) субъект (интервьюер), производящий измерение.

Предпосылки надежного измерения кроются в каждой отдельной составляющей. Прежде всего, когда в качестве объекта измерения выступает человек, то он в отношении измеряемого свойства может обладать значительной степенью неопределенности. Так, зачастую у респондента нет четкой иерархии жизненных ценностей, а следовательно, нельзя получить и абсолютно точные данные, характеризующие для него важность тех или иных явлений. Он может быть плохо мотивирован, вследствие чего невнимательно отвечает на вопросы. Однако только в последнюю очередь следует искать причину ненадежности оценок в самом респонденте.

С другой стороны, возможно, способ получения оценки не в состоянии дать максимально точных значений измеряемого свойства. Например, у респондента существует развернутая иерархия ценностей, а для получения информации используется шкала с вариациями ответов только «очень важно» и «совсем неважно». Как правило, из приведенного набора все ценности помечаются ответами «очень важно», хотя реально у респондента имеется большее число уровней значимости.

Наконец, при наличии высокой точности первых двух составляющих измерения субъект, производящий измерение, может допускать ошибки: нечетко составлены инструкции к анкете; интервьюер каждый раз по-разному формулирует один и тот же вопрос, используя различную терминологию, и др.

Например, в процессе интервью, в ходе которого должна быть выявлена система ценностей опрашиваемого, интервьюер не смог довести до респондента суть опроса, не смог добиться доброжелательного отношения к исследованию и пр.

Каждая составляющая процесса измерения может быть источником ошибки, связанной либо с устойчивостью, либо с правильностью, либо с обоснованностью.

Однако, как правило, исследователь не в состоянии разделить эти ошибки по источникам их происхождения и поэтому изучает ошибки устойчивости, правильности и обоснованности всего измерительного комплекса в совокупности. При этом правильность (как отсутствие систематических ошибок) и устойчивость информации — элементарные предпосылки надежности. Наличие существенной ошибки в этом отношении уже сводит на нет проверку данных измерения на обоснованность.

В отличие от правильности и устойчивости, которые могут быть измерены достаточно строго и выражены числовым показателем, критерии обоснованности определяются либо на основе логических рассуждений, либо на основе косвенных показателей. Обычно применяется сравнение данных одной методики с данными других методик или исследований.

Прежде чем приступать к изучению таких компонентов надежности, как устойчивость и обоснованность, необходимо убедиться в правильности выбранного **инструмента измерения**. Измерение может быть вполне точным и вместе с тем неправильным, постоянно воспроизводя какую-то систематическую ошибку, как это случается с испорченным термометром, в котором ртутный столбик изначально фиксирован на неверной исходной отметке и постоянно завышает температуру, скажем, на 0,8 градусов.

При измерении социальных показателей проблема правильности, т.е. отсутствия отклонений от истинного значения измеряемого свойства, намного сложнее, ибо часто мы в принципе не способны установить, каковы же эти истинные значения измеряемых свойств (скажем, мнений людей по каким-то вопросам). Мы можем лишь, сопоставляя разные способы фиксирования данного свойства, добиваться устранения замеченных систематических ошибок.

Возможно, последующие этапы окажутся излишними, если в самом начале выяснится полная неспособность данного инструмента измерения на требуемом уровне дифференцировать изучаемую совокупность, иначе говоря, если окажется, что систематически не используется какая-то часть шкалы, либо та или иная градация шкалы или вопроса. И, наконец, возможно, что исходный признак не обладает дифференцирующей способностью в отношении объекта измерения.

Прежде всего, нужно ликвидировать или уменьшить такого рода недостатки шкалы и только затем использовать ее в исследовании.

### **Проверка правильности шкалы**

*· отсутствие разброса ответов по значениям шкалы.* Попадание ответов в один пункт свидетельствует о полной непригодности измерительного инструмента — шкалы. Такая ситуация может возникнуть или из-за «нормативного» давления в сторону общепринятого мнения, или из-за того, что градации (значения) шкалы не имеют отношения к распределению данного свойства у рассматриваемых объектов (нерелевантны).

Например, при опросе все ответы концентрируются в позитивном или только в негативном конце шкалы. Конечно, это может быть и результатом единодушия оценок, но может быть и результатом того, что сама шкала неудачна, например, содержит какой-то пункт, сформулированный с сильным нормативным давлением на опрашиваемых. Допустим, задан вопрос об употреблении алкоголя и крайне негативный вариант ответа звучит так: «Я пью систематически и обычно до бесчувственного состояния». Сомнительно, чтобы даже заведомый алкоголик отметил такой пункт как показатель своего отношения к спиртному. Скорее всего, он выберет суждение с менее неприятным оттенком, например: «Я выпиваю довольно часто». Крайне отрицательный пункт шкалы здесь «не работает», он отпугивает. Вследствие этого шкала спроектирована неправильно.

Другой пример. Если все опрашиваемые респонденты согласны с утверждением: «хорошо, когда используется эффективная система мотивации труда», нет ни одного ответа «не согласен», то подобная шкала не поможет дифференцировать отношение респондентов к разным методам мотивации труда.

- *использование части шкалы.* Довольно часто обнаруживается, что практически работает лишь какая-то часть шкалы, какой-то один из ее полюсов с прилегающей более или менее обширной зоной. Так, если респондентам для оценки предлагается шкала, имеющая положительный и отрицательный полюса, в частности от +3 до —3, то при оценивании какой-то заведомо положительной ситуации респонденты не используют отрицательные оценки, а дифференцируют свое мнение лишь с помощью положительных.

- *неравномерное использование отдельных пунктов шкалы.* Случается, что некоторое значение признака систематически выпадает из поля зрения респондентов, хотя соседние градации, характеризующие более низкую и более высокую степень выраженности признака, имеют существенное наполнение.

#### **Приемы проверки устойчивости измерений:**

- повторное измерение (тестирование);
- включение в анкету эквивалентных вопросов
- разделение выборки (числа опрашиваемых) на две части.

Наиболее распространенный прием контроля на устойчивость — **повторное измерение** — состоит во вторичном проведении проверяемого измерения в одной и той же выборке через определенный промежуток времени. Обычно один и тот же объект измеряется дважды с двух-, трехнедельным временным интервалом и с помощью одинаковой процедуры. Шкала считается устойчивой, если совпадения между первой и второй сериями измерений будут достаточно высокими.

Включение в анкету **эквивалентных вопросов** предполагает использование в одной анкете вопросов по той же проблеме, но сформулированных по-другому. Их респондент должен воспринимать как разные вопросы. Главная опасность данного

метода заключается в степени эквивалентности вопросов; если это не достигается, то респондент отвечает на разные вопросы.

**Разделение выборки на две части** основано на сравнении ответов на вопросы двух групп респондентов. Предполагается, что эти две группы являются идентичными по своей композиции и что средние оценки ответов для этих двух групп являются очень близкими. Все сравнения делаются только на групповой основе, поэтому сравнение внутри группы проводить невозможно.

Например, среди студентов колледжа с помощью шкалы Лайкерта с пятью градациями был проведен опрос относительно их будущей карьеры. В анкете приводилось утверждение: «Я считаю, что меня ожидает блестящая карьера». Ответы были обобщены, начиная с «совершенно не согласен» (1 балл) и кончая «совершенно согласен» (5 баллов). Затем общая выборка опрошенных была разделена на две группы и были вычислены средние оценки для этих групп. Средняя оценка была одинаковой для каждой группы и равнялась 3 баллам. Данные результаты дали основание считать измерение надежным. Когда же проанализировали групповые ответы более внимательно, то оказалось, что в одной группе все студенты ответили и «согласен» и «не согласен», а в другой — 50% ответили «совершенно не согласен», а 50% — «совершенно согласен». Как видим, более глубокий анализ показал, что ответы не являются идентичными.

Вследствие данного недостатка этот метод оценки устойчивости измерений является наименее популярным.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Изучить теоретический материал
2. По указанию преподавателя выбрать объект или процесс, характерный для заданной физиологической системы.
3. Предложить множество измеряемых информативных характеристик объекта (процесса) по результатам анализа различных источников (включая медицинские базы данных)



4. Сформировать описание объекта (процесса) в различных модальностях и метриках.
5. Предложить функции масштабирования при использовании различных единиц измерения как пространственных, так и временных характеристик.
6. Выполнить описание объекта (процесса) в различных модальностях и разработать алгоритм перехода от одного описания к другому.
7. Оформить отчет, включающий: описание объекта, используемые метрики и модальности, формулы масштабирования и алгоритм перехода от одних модальностей к другим, оценить функциональность (однозначность) перехода, краткие ответы не менее чем на три контрольных вопроса.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое метрика?
2. Для чего применяется шкалирование?
3. Что такое модальность измеряемой характеристики?
4. Как переходить от одного вида шкалирования к другому?
5. Для чего применяется масштабирование в имитационном моделировании?
6. Как осуществляется масштабирование с помощью линейного преобразования?
7. Каким образом снижается метрика пространства состояний?
8. Что такое бутстреп технология обработки данных?
9. Как влияет закон распределений на метод шкалирования?
10. Каким образом оптимизируется бальная шкала ответов на вопросники в медицинских обследованиях?
11. Каким образом обеспечивается интерфейс соотнесения шкал между различными составляющими кибернетических систем?
12. Каким образом осуществляется сравнение объектов (процессов, состояний) в различных шкалах, метриках, модальностях?
13. Как вычисляются меры различия (расстояния) в различных шкалах?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ.**

**Цель работы:** овладение навыками составления дифференциальных уравнений, отражающих динамику линейных звеньев системы управления, на примере частотных фильтров.

### **Краткие теоретические сведения.**

Система управления биотехническими объектами в общем случае может быть представлена в виде совокупности параллельных и последовательных звеньев с определенными передаточными функциями, определяющими преобразование «ВХОД»-«ВЫХОД».

В случае достаточной формализации законов функционирования звеньев биотехнической системы их работа может моделироваться с помощью электрических и электронных аналогов, которые так же могут быть использованы для формирования управляющих сигналов и-или системы измерения некоторой информации о текущем состоянии объекта БТС.

Таким образом, математическое описание системы управления на начальном этапе состоит в структурно-параметрической идентификации уравнений, связывающих входные и выходные величины звеньев. Зная уравнения звеньев, можно составить уравнение функционирования системы управления в целом в случае известной схемы соединения по определенным правилам. Обратная задача состоит в синтезе схемы последовательно-параллельной схемы соединения с определенными обратными и прямыми связями по известному уравнению функционирования системы в целом представить ее состоящий из элементарных типовых звеньев с известными характеристиками и методиками анализа и расчета.

В статическом режиме каждое звено описывается алгебраическими уравнениями, в динамике – дифференциальными. Последние, в силу аналогии с механическими системами, часто называют уравнениями динамики системы управления.

Биотехнические системы управления, как правило, являются нелинейными, поэтому применяют следующие два способа линеаризации.

- 1) Нелинейные функции раскладываются в ряд Тейлора с определенной точностью;
- 2) Из уравнений звеньев, составленных для режима малых отклонений переменных от уравнений равновесных состояний, вычитаются уравнения равновесных.

Среди методов исследования систем управления получили частотные, основанные на анализе линейных дифференциальных уравнений, характеризующих систему (звено системы). В этом случае, уравнение, связывающее вход и выход имеет вид:

$$\sum_{i=0}^n (a_i \cdot y^{(i)}(t)) = \sum_{j=0}^m (b_j \cdot x^{(j)}(t)), \quad (1)$$

где  $x(t)$ ,  $y(t)$  – входная и выходная переменные соответственно.

Затем уравнение представляются в их изображениях по Лапласу. Исходная переменная называется оригиналом, ее преобразование – изображением.

В этом случае под передаточной функцией непрерывной линейной динамической системы называется отношение преобразования Лапласа выходной переменной к преобразованию Лапласа входной:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m + \sum_{j=1}^{m-1} (b_j \cdot p^{(j+1)})}{a_n + \sum_{i=1}^{n-1} (a_i \cdot p^{(i+1)})} . \quad (2)$$

Полученная передаточная функция:

1. является дробно-рациональной функции, причем не в усилительных системах порядок числителя не превышает порядок знаменателя;
2. имеет степень, равную разности степеней знаменателя и числителя;
3. характеризуется индексом апериодической нейтральности равным числу нулевых полюсов;

4. характеризуется индексом колебательной нейтральностью равным числу мнимых корней;

5. характеризуется индексом неустойчивости равным числу правых полюсов.

По передаточной функции можно однозначно определить переходный процесс.

Поскольку корни и полюса передаточной функции являются в общем смысле комплексно-сопряженными, то полиномы в формуле (2) могут быть представлены в виде множителей типа:

$$k_1 \cdot p, \quad (k_2 \cdot p + k_3), \quad (k_4 \cdot p^2 + k_5 \cdot p + k_6) . \quad (3)$$

(Некоторые коэффициенты могут быть равными 0.)

Важное значение для описания и изучения линейных систем в БТС имеют частотные характеристики (как реакции системы на входное гармоническое воздействие), получаемые путем замены в (2) оператора  $p$  на  $j\omega$ , к которым относятся:

- амплитудно-фазовая частотная характеристика - АФЧХ;
- амплитудно-частотная характеристика - АЧХ;
- фазовая частотная характеристика – ФЧХ;
- вещественная частотная характеристика;
- мнимая частотная характеристика;
- логарифмическая амплитудно-частотная характеристика - ЛАЧХ;
- логарифмическая фазовая частотная характеристика.

АФЧХ представляется в виде:  $W(j\omega) = U(\omega) + j \cdot V(\omega)$ . Тогда:

- АЧХ показывает, как система пропускает сигнал различной частоты и вычисляется как  $A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$  ;

- кривая ФЧХ показывает изменения сдвига фаз выходной величины по отношению к входной в зависимости от частоты и

определяется по формуле:  $\varphi(\omega) = \arg(W(j\omega)) = \arctg\left(\frac{V(\omega)}{U(\omega)}\right)$  .

К показателям частотных характеристик относятся: колебательность, резонансная частота, полоса пропускания системы, частота среза.

ЛАЧХ называется кривая, построенная в логарифмическом масштабе частот в соответствии с выражением  $L(\omega) = 20 \cdot \lg(A(\omega))$ . Единицей измерения является децибел. Точка пересечения ЛАЧХ с осью абсцисс называется частотой среза.

К типовым динамическим звеньям относятся элементы, обладающие определенными динамическими свойствами, определяемые формой переходного процесса при подаче на вход скачкообразного воздействия. К таким звеньям относятся элементы со следующими передаточными функциями:

- идеальное усилительное (безинерционное, пропорциональное):  $W(p) = k$  ;

- апериодическое (инерционное) первого порядка:  $W(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1}$  ;

- идеальное интегрирующее:  $W(p) = \frac{k}{p}$  ;

- реальное интегрирующее:  $W(p) = \frac{k}{p \cdot (T \cdot p + 1)}$  ;

- дифференцирующее:  $W(p) = K \cdot p$  ;

- дифференцирующее звено с запаздыванием:  $W(p) = \frac{k \cdot p}{T \cdot p + 1}$  .

В случае, если звено управляющей системы моделируется электрической или электронной схемой, представленной четырех-полюсником, то передаточная функция определяется как отношение входного сопротивления к выходному. Первое рассчитывается при замыкании входа, второе – выхода четырех-полюсника.

Дифференциальное уравнение электрической схемы получается согласно законам Кирхгофа, применяемым в электротехнике, с предварительным выделением усилительного (безинерционного) звена.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Согласно варианта задания выбрать схему и номиналы резисторов, емкостей, катушек индуктивностей;
2. Определить входное и выходное сопротивление выбранной схемы;

3. Определить передаточную функцию.
4. Построить графики частотных характеристик (АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, вещественная частотная характеристика, мнимая частотная характеристика, логарифмическая амплитудно-частотная характеристика – ЛАЧХ, - логарифмическая фазовая частотная характеристика) с использованием любых программных инструментов. Определить передаточные функции типовых звеньев для выбранной согласно варианту схемы и номиналов.
5. Осуществить декомпозицию системы на типовые звенья, для каждого из которого выполнить п.5.
6. Сделать выводы по результатам, полученным в пп. 4,5
7. Оформите отчет, включающий результаты и выводы, «скрин-шоты» и пояснения к ним, краткие ответы на контрольные вопросы (не менее 3) с указанием, при необходимости, информационных источников.

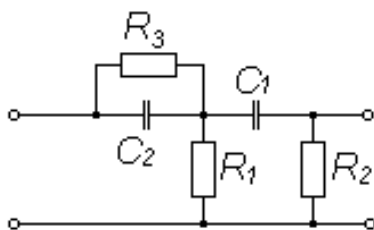
### Варианты заданий:

Для всех вариантов:

$R_1=10\text{КОм}$ ,  $R_2=15\text{КОм}$ ,  $R_3=8\text{КОм}$ ,  $R_4=12\text{КОм}$ ,

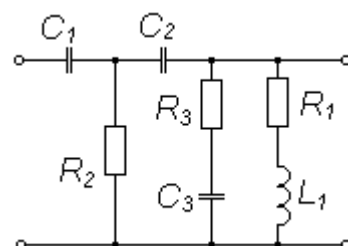
$C_1=1\mu\text{F}$ ,  $C_2=1.5\mu\text{F}$ ,  $C_3=0.5\mu\text{F}$ ,  $L=1\text{мГн}$ .

Вариант 1

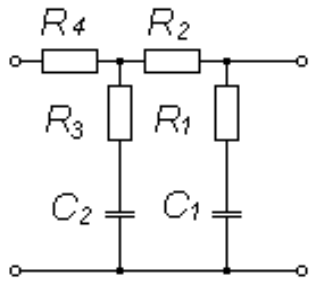


Вариант 3

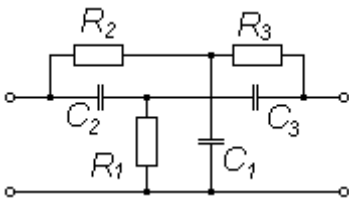
Вариант 2



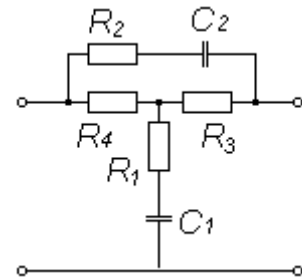
Вариант 4



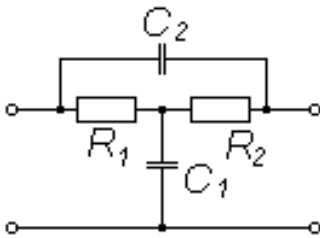
Вариант 5



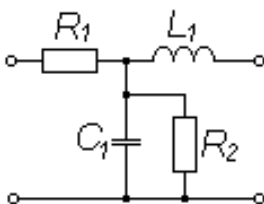
Вариант 6



Вариант 7



Вариант 8



Примечание: для вариантов (7-12) номиналы элементов цепи: у резисторов – увеличиваются в 1,5 раза, у емкостей и индуктивностей – уменьшаются на 20%; для вариантов (13)-(18) номиналы элементов цепи: у резисторов – уменьшаются на 40%, у емкостей и индуктивностей активных – увеличиваются в 2 раза. Номер варианта соответствует порядковому номеру в журнале академической группы или назначается преподавателем.

**Контрольные вопросы:**

1. Как определяется передаточная функция при статическом режиме?
2. Как определяется передаточная функция динамического режима работы системы управления?
3. Какие используются основные частотные характеристики системы?
4. Из каких типовых элементов (звеньев) состоит система управления?
5. Как составляется дифференциальное уравнение системы управления?
6. В чем заключается методика получения передаточной функции из дифференциального уравнения системы управления?
7. Каким образом осуществляется декомпозиция системы управления на типовые звенья по передаточной функции системы?



## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СУ БТС**

**Цель работы:** овладение навыками композиции и декомпозиции структурных схем систем управления с заданными передаточными функциями.

### **Краткие теоретические сведения.**

Одной из форм представления систем автоматического управления биотехническими системами (СУ БТС) являются структурные схемы с определенными передаточными функциями системы или звеньев ее составляющей. Это значительно упрощает процесс исследования, поскольку показывает направление распространения сигнала, давая наглядное представление о взаимодействии элементов, составляющих систему.

Основные элементы структурной схемы – звенья направленного воздействия, характеризуемые определенной передаточной функцией: устройства сравнения или сумматоры, линии связи и точки разветвления или узлы. Любую сложную передаточную функцию можно разложить на более простые составляющие с (и без) контуров положительных и(или) отрицательных обратных связей. Выполнив подобное преобразование, можно представить сложную систему управления как совокупность последовательно-параллельных соединений типовых передаточных звеньев с более простыми передаточными функциями, которым соответствуют, в случае электронного моделирования или синтеза систему управления, элементарные корректирующие активные и пассивные электрические цепи.

### Правила преобразования структурных схем следующие:

1. В случае последовательного соединения звеньев, результирующая передаточная функция равна произведению передаточных функций звеньев.
2. В случае параллельного соединения звеньев, результирующая передаточная функция равна сумме передаточных функций звеньев.

3. Передаточная функция звена с обратной связью определяется как  $W = \frac{W_1}{1 \pm W_{os} \cdot W_1}$ , где  $W_1$  – передаточная функция основного (прямого) звена,  $W_{os}$  – передаточная функция обратной связи, «+» - соответствует отрицательной обратной связи, минус – отрицательной.
4. При переносе узла через звено по направлению распространения сигнала необходимо включить элемент в линию отвлечения с передаточной функцией обратно пропорциональной.
5. При переносе узла через звено против направления распространения сигнала необходимо включить элемент в линию связи с той же передаточной функцией.
6. При переносе сумматора через звено против направления передачи сигнала, необходимо в линию связи по второму входу сумматора включить элемент с передаточной функцией обратно пропорциональной передаточной функции обратного звена.
7. При переносе узла через звено с определенной передаточной функцией по направлению распространения сигнала необходимо в линию связи по второму входу суммирующего устройства включить элемент с передаточной функцией того же звена.
8. Элементы сравнения (или сумматоры ) можно менять местами с учетом соблюдения принципа суперпозиции и переместительного закона и знаков суммирования по входам элемента сравнения.

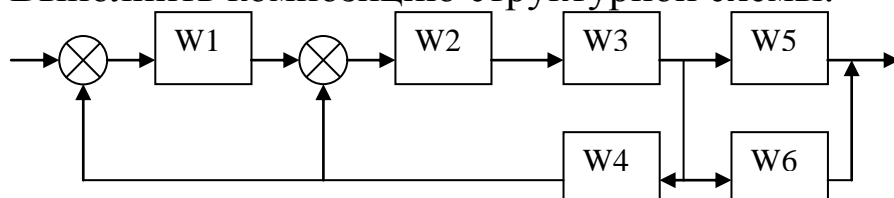
### **Порядок выполнения работы.**

1. Самостоятельно изучить теоретический материал и по согласованию с преподавателем выбрать варианты структурных схем композиции и декомпозиции.
2. Выполнить композицию заданных преподавателем структурных схем и определить результирующую передаточную функцию.
3. По заданной преподавателем формуле передаточной функции выполнить ее анализ и декомпозицию на элементарные схемы им соответствующими передаточными функциями.

4. Оформите отчет, включающий результаты и выводы, краткие ответы на контрольные вопросы (не менее 3) с указанием, при необходимости, информационных источников.

**Пример задания:**

1. Выполнить композицию структурной схемы:



2. Синтезировать структурную схему (и выполнить ее декомпозицию), соответствующую следующей формуле:

$$W = 5 + \frac{(1-W1)^2}{1+W1 \cdot W3} \cdot \frac{3+2 \cdot W1 \cdot W2 + W1 \cdot W1 + W2^2}{1-W1 \cdot W2}.$$

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется передаточной функцией системы управления?
2. Для чего необходимо преобразовывать схемы систем управления?
3. Как влияют обратные связи на структурные преобразования систем управления?
4. Каким образом составляется результирующая передаточная функция системы управления по известным передаточным функциям ее элементов?
5. Каким образом осуществляется синтез структурной схемы САУ по выражению передаточной функции.
6. Каким образом влияет характер обратной связи на выражение передаточной функции?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТЫ №3. (ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ) ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ САУ БТС**

### 1. Цель работы

Целью работы является изучение структурных преобразований и нахождения передаточных функций с использованием автоматизированных средств моделирования на ПК – MATLAB, SIMULINK.

### 2. Задачи работы

- Закрепление, углубление и расширение знаний студентов при исследовании преобразований структурных схем.
- Приобретение умений и навыков работы с программой математического моделирования MATLAB.
- Овладение несколькими методами преобразования структурных схем.

### 3. Теоретическая часть

Для наглядного представления сложной системы как совокупности элементов и связей между ними используются структурные схемы.

Структурной схемой называется схема САУ, изображенная в виде соединения ПФ составляющих ее звеньев.

Структурная схема показывает строение автоматической системы, наличие внешних воздействий и точки их приложения, пути распространения воздействий и выходную величину. Динамическое или статическое звено изображается прямоугольником, в котором указывается ПФ звена. Воздействия на систему и влияние звеньев друг на друга (сигналы) изображаются стрелками. В каждом звене воздействие передается только от входа звена к его выходу.

На динамическое звено может воздействовать лишь одна входная величина, поэтому используются блоки суммирования и сравнения сигналов. Суммироваться и сравниваться могут лишь сигналы одной и той же физической природы.

Структурная схема может быть составлена по уравнению системы в пространстве состояний или по системе дифференциальных уравнений. При составлении структурной схемы удобно начинать

с изображения задающего воздействия и располагать динамические 16 звенья, составляющие прямую цепь системы, слева направо до регулируемой величины. Тогда основная обратная связь и местные обратные связи будут направлены справа налево.

Различные способы преобразования структурных схем облегчают определение ПФ сложных САУ и дают возможность привести многоконтурную систему к эквивалентной ей одноконтурной схеме.

Преобразование структурной схемы должно осуществляться на основании правил, основные из них приведены в табл. 1.

При выполнении преобразований следует каждое имеющееся в схеме типовое соединение заменить эквивалентным звеном. Затем можно выполнить перенос точек разветвления и сумматоров, чтобы в преобразованной схеме образовались новые типовые соединения звеньев. Эти соединения опять заменяются эквивалентными звеньями, затем вновь может потребоваться перенос точек разветвления и сумматоров и т. д.

Различают основные соединения блоков в структурных схемах: последовательное соединение, параллельное соединение, антипараллельное соединение (обратная связь), в свою очередь обратная связь может быть отрицательной и положительной.

Таблица 1. Основные правила преобразования структурных схем

Преобразование	Структурная схема	
	Исходная	Эквивалентная
Свертывание последовательного соединения		 $W = W_1 W_2 \dots W_n$
Свертывание параллельного соединения		 $W = W_1 + W_2 + \dots + W_n$
Свертывание обратной связи		 $W = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$
Перенос узла через звено вперед		 $W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос узла через звено назад		
Перенос сумматора через звено вперед		 $W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос сумматора через звено назад		 $W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос прямой связи через звено		
Перенос узла через сумматор вперед		
Перенос узла через сумматор назад		

Пример. Пусть необходимо получить эквивалентное представление для структуры, приведенной на рис. 1.

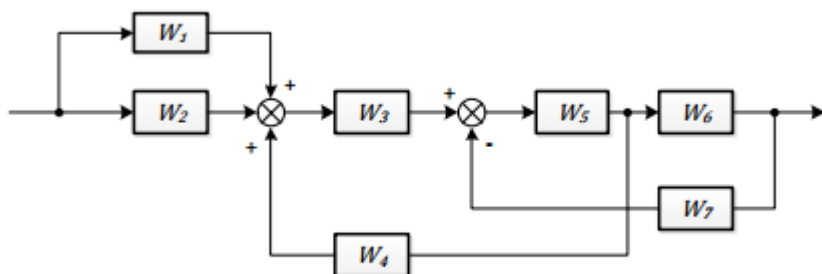


Рис. 1. Исходная схема САУ

Преобразование включает несколько этапов, показанных на рис. 2–5.

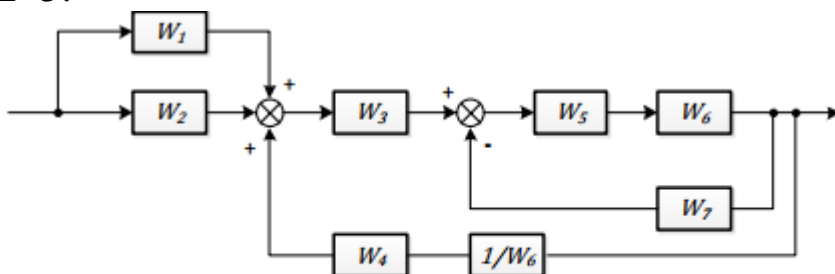


Рис. 2. Перенос узла через сумматор

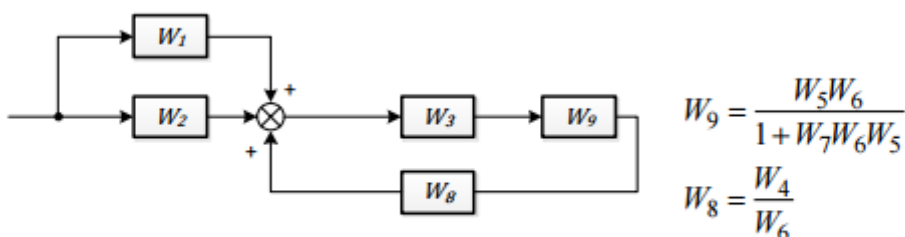


Рис. 3. Свертывание обратной связи и последовательного соединения

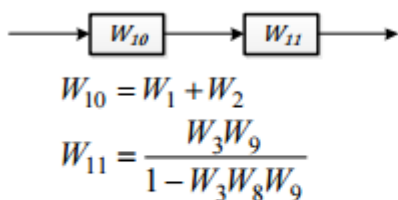


Рис. 4. Свертывание обратной связи и параллельного соединения



$$W_{2кв} = W_{10} W_{11} = \frac{W_1 W_3 W_5 W_6 + W_2 W_3 W_5 W_6}{1 + W_5 W_6 W_7 - W_3 W_4 W_5}$$

Рис. 5. Свертывание последовательного соединения

Таким образом, первый способ преобразования структурных схем заключается в непосредственном использовании правил, приведенных в табл.1. Неудобство использования этого подхода

заключается в том, что порядок применения формул здесь достаточно произволен, возможны ошибочные шаги, усложняющие поиск решения.

Второй способ для получения ПФ многоконтурной системы заключается в использовании модели системы в виде сигнального графа. Сигнальный граф позволяет графически описать линейные связи между переменными, он состоит из узлов (вершин) и соединяющих их направленных ветвей.

Ветвь соответствует блоку структурной схемы, она отражает зависимость между входной и выходной переменными. Сумма всех сигналов, входящих в узел, образует соответствующую этому узлу переменную.

Последовательность ветвей между двумя узлами называется путем. Контуром называется замкнутый путь, который начинается и заканчивается в одном и том же узле, причем ни один узел не встречается на этом пути дважды.

Контуры называются некасающимися, если они не имеют общих узлов.

Сигнальный граф – это просто наглядный метод записи системы алгебраических уравнений, показывающий взаимосвязь между переменными.

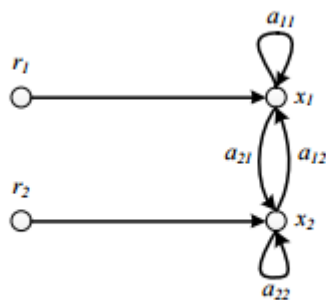


Рис. 6 Сигнальный граф для двух алгебраических выражений

В качестве примера рассмотрим следующую систему алгебраических уравнений:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + r_1 = x_1, \quad (1)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + r_2 = x_2. \quad (2)$$

здесь  $r_1$  и  $r_2$  – входные переменные, а  $x_1$  и  $x_2$  – выходные переменные. Сигнальный граф, соответствующий уравнениям (1)



и (2), изображен на рис. 6. Уравнения (1) и (2) можно записать в ином виде:

$$\begin{aligned}x_1(1-a_{11})+x_2(-a_{12}) &= r_1, \\x_1(-a_{21})+x_2(1-a_{22}) &= r_2.\end{aligned}$$

Решая последнюю систему по правилу Крамера, получим:

$$\begin{aligned}x_1 &= \frac{(1-a_{22})r_1 + a_{12}r_2}{(1-a_{11})(1-a_{22}) - a_{12}a_{21}} = \frac{(1-a_{22})}{\Delta}r_1 + \frac{a_{12}}{\Delta}r_2, \\x_2 &= \frac{(1-a_{11})r_2 + a_{21}r_1}{(1-a_{11})(1-a_{22}) - a_{12}a_{21}} = \frac{(1-a_{11})}{\Delta}r_2 + \frac{a_{21}}{\Delta}r_1.\end{aligned}$$

В этих решениях знаменатель равен определителю, составленному из коэффициентов при неизвестных, и его можно записать так:

$$\Delta = (1-a_{11})(1-a_{22}) - a_{12}a_{21} = 1 - a_{11} - a_{22} + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

В данном случае знаменатель равен единице минус коэффициенты передачи отдельных контуров  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  и  $a_{12}a_{21}$  плюс произведение коэффициентов передачи двух некасающихся контуров  $a_{11}$  и  $a_{22}$ . Контур  $a_{22}$  и  $a_{12}a_{21}$  являются касающимися, так же, как и контуры  $a_{11}$  и  $a_{21}a_{12}$ .

В решении для  $x_1$  по отношению ко входу  $r_1$  числитель равен единице, умноженной на  $(1-a_{22})$ , т.е. значение определителя некасающегося пути от  $r_1$  к  $x_1$ . В решении для  $x_1$  по отношению ко входу  $r_2$  числитель просто равен  $a_{12}$ , т.к. этот путь касается всех контуров. Числитель выражения  $x_2$  симметричен соответствующему числителю для  $x_1$ .

В общем случае линейная зависимость  $T_{ij}$  между независимой переменной  $x_i$  (часто называемой входной переменной) и зависимой переменной  $x_j$  определяется по формуле Мейсона:

$$T_{ij} = \frac{\sum_k P_{ijk} \Delta_{ijk}}{\Delta},$$

где  $P_{ijk}$  – коэффициент передачи  $k$ -го пути от переменной  $x_i$  к переменной  $x_j$ ,  $\Delta$  – определитель графа,  $\Delta_{ijk}$  – дополнительный множитель для пути  $P_{ijk}$ , а суммирование производится по всем

возможным  $k$  путям от  $x_i$  до  $x_j$ . Дополнительный множитель  $\Delta_{ijk}$  равен определителю всех касающихся контуров при удалении  $k$ -го пути. Определитель находится как:

$$\Delta = 1 - \sum_{k=1}^K L_k + \sum_{m=1, q=1}^{M, Q} L_m L_q + \sum_{r=1, s=1, l=1}^{R, S, L} L_r L_s L_l$$

где  $\sum_{k=1}^K L_k$  – сумма коэффициентов передачи всех отдельных контуров;  $\sum_{m=1, q=1}^{M, Q} L_m L_q$ ,  $1, 1$  – сумма произведений всех возможных комбинаций из двух некасающихся контуров;  $\sum_{r=1, s=1, l=1}^{R, S, L} L_r L_s L_l$ ,  $1, 1, 1$  – сумма произведений всех возможных комбинаций из трех некасающихся контуров.

Таким образом, правило вычисления  $\Delta$  через значение  $L_1, L_2, L_3 \dots L_N$  таково:  $\Delta = 1 -$  (сумма коэффициентов передачи всех отдельных контуров)  $+$  (сумма произведений всех возможных комбинаций из 2 некасающихся контуров)  $-$  (сумма произведений всех возможных комбинаций из 3 некасающихся контуров)  $+$  ...

Формула Мейсона часто используется в несколько упрощенном виде для определения связи между выходной переменной  $Y(s)$  и входной переменной  $X(s)$ , т.е.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = W(s) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \Delta_i}{\Delta}$$

где  $P_i$  –  $i$ -й путь от входа к выходу;  $N$  – количество путей;  $\Delta$  – определитель графа, специальный полином, который определенным образом характеризует совокупность всех замкнутых цепей системы, содержащих обратные связи, и вычисляется как сумма передаточных функций разомкнутых контуров этих цепей и произведений передаточных функций разомкнутых контуров пар, троек и т.д. не соприкасающихся друг с другом цепей с обратными связями;  $\Delta_i$  – дополнительный множитель для пути, составляется по правилу, аналогичному  $\Delta$ , но только для цепей с обратными связями, не соприкасающихся с  $i$ -м прямым каналом.

Дополнительный множитель для  $i$ -го пути равен определителю графа, в котором приравнены нулю коэффициенты передачи контуров, касающихся этого пути.

Рассмотрим пример получения ПФ многоконтурной системы с использованием формулы Мейсона для структуры на рис. 1, которой соответствует граф, показанный на рис. 7.

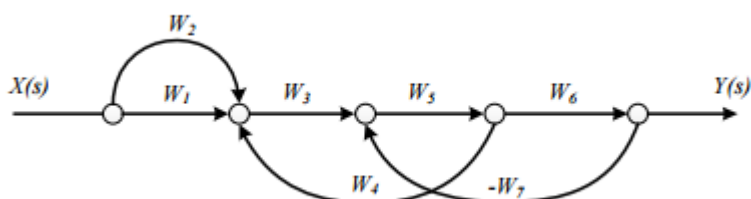


Рис. 7. Описание системы управления сигнальным графом

От входа к выходу ведут два пути:

$$P1 = W1W3W5W6$$

$$P2 = W2W3W5W6$$

В графе есть 2 контура:

$$L1 = W3W4W5$$

$$L2 = -W5W6W7$$

Контур  $L1$  пересекает контур  $L2$ , поэтому определитель графа вычисляется по формуле:

$$\Delta = 1 - (L1 + L2)$$

Контуры в этом примере пересекают все пути, поэтому дополнительные множители путей равны

$$\Delta1 = 1 \quad \Delta2 = 1$$

Окончательно можно записать:

$$W(s) = \frac{\sum_{i=1}^2 P_i \Delta_i}{\Delta} = \frac{W1W3W5W6 + W2W3W5W6}{1 + W5W6W7 - W3W4W5}$$

Таким образом, использование сигнальных графов и применение формулы Мейсона позволяет алгоритмизировать процесс упрощения структурной схемы. Третий способ для получения ПФ заключается в составлении системы уравнений. Необходимо обозначить выходы сумматоров и составить систему уравнений

на основе этих обозначений. На рис.9 представлена исходная схема с обозначенными сумматорами.

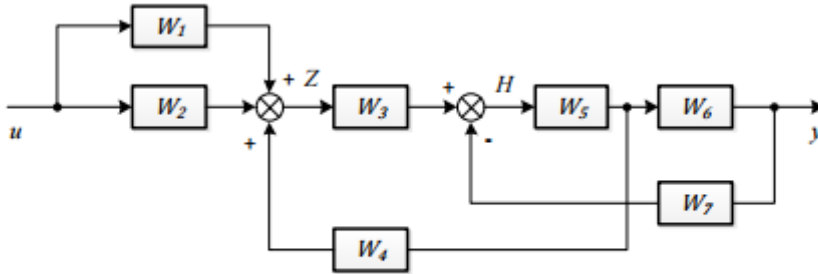


Рис. 9. Исходная схема САУ с обозначенными сумматорами

Опишем все сигналы в системе в виде уравнений:

$$\begin{aligned} Z &= (W_1 + W_2)u + W_5W_4H \\ H &= W_3Z - W_7y \\ y &= W_5W_6H \end{aligned}$$

Подставив последовательно значения сигналов, найдем ПФ.

$$H = ((W_1 + W_2)u + W_5W_4H)W_3 - W_7y$$

После преобразования получим:

$$H = \frac{(W_1W_3 + W_2W_3)u - W_7y}{1 - W_3W_4W_5}$$

Подставим полученное значение H в уравнений у:

$$y = \frac{((W_1W_3 + W_2W_3)u - W_7y)W_5W_6}{1 - W_3W_4W_5}$$

Получим ПФ вида:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{W_1W_3W_5W_6 + W_2W_3W_5W_6}{1 + W_5W_6W_7 - W_3W_4W_5}$$

#### 4. Краткое описание MATLAB

Лабораторная работа выполняется в программе математического моделирования MATLAB. Программа MATLAB включает в себя пакет прикладных программа для решения технических задач и одноименный язык программирования, используемый в этом пакете.

Основными компонентами системы являются базовая система MATLAB и пакет моделирования систем Simulink. Остальные пакеты расширения разбиты на 4 категории – расширения

Extension MATLAB и Extension Simulink, а также комплексы пакетов расширения Blockset и Toolbox.

Раздел MATLAB Extension содержит средства для подготовки исполняемых приложений MATLAB (с подключаемыми библиотеками и без них).

Раздел Toolbox (инструментальные средства) содержит самое большое число пакетов расширений системы MATLAB, такие как «Control system», «Database», «Fuzzy logic», «Wavelet» и т.д.

В разделе Blockset расположено несколько пакетов, относящихся к главному пакету расширения системы MATLAB-Simulink, такие как «DSP», «Fixed-Point», «Nonlinear control design» и «Power systems».

В разделе Extension Simulink имеется ряд средства, предназначенных для моделирования в реальном масштабе времени и событийно- управляемом моделировании.

### 5. Структурные преобразования в MATLAB

В пакете MATLAB имеется ряд функций, с помощью которых можно выполнять структурные преобразования (используется эквивалентная схема):

- $\text{series}(w1,w2)$  – последовательное соединение звеньев;
- $\text{parallel}(w1,w2)$  – параллельное соединение звеньев;
- $\text{feedback}(w1,w2)$  – включение звена  $w2$  в контур отрицательной обратной связи к  $w1$ ;
- $\text{feedback}(w1,w2,\text{sign})$  – включение звена  $w2$  в контур обратной связи звена  $w1$  с указанием знака  $+$  или  $-$  (очевидно,  $\text{feedback}(w1,w2) = \text{feedback}(w1,w2,-1)$ );

### 6. Задание на лабораторную работу

Выполнить преобразование структурной схемы САУ в эквивалентную передаточную функцию. Составить модель исходной схемы САУ в MATLAB. С помощью ряда функций MATLAB (структурные преобразования) составить эквивалентную схему. Вариант задания назначается преподавателем.

### 7. Методика выполнения задания

Порядок выполнения работы:

1. Выполнить преобразование заданного варианта структурной схемы САУ (см. табл. 2) в эквивалентную ПФ тремя способами:

- непосредственно используя правила табл. 1;
  - используя представление в виде сигнального графа и формулу Мейсона;
  - составив систему уравнений и решив её.
2. В качестве звеньев  $W_1, W_2, W_3$  использовать типовые динамические звенья с параметрами:
- $$W_1 = \frac{3}{s+1}; W_2 = \frac{4s+4}{s}; W_3 = \frac{3s+1}{2s+1}$$
3. Составить модель исходной схемы САУ в MATLAB, построить реакцию получившейся модели на ступенчатое и импульсное воздействия;
4. С помощью ряда функций MATLAB (структурные преобразования) составить эквивалентную схему и построить реакцию на ступенчатое и импульсное воздействия.
5. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

№	Исходная схема
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

8. Требования к содержанию и оформлению отчета  
Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) описание всех этапов преобразования исходной схемы и получающихся промежуточных результатов, выполненными тремя способами, моделирование реакции схемы на типовое воздействие (скачок) до и после преобразования;
- б) сигнальный граф системы, описание путей, контуров, расчет ПФ по формуле Мейсона;
- в) решение составленной системы уравнений;
- г) схема модели и протокол команд MATLAB;
- д) графики переходных процессов при подаче на вход исходной и эквивалентной схемы типовых тестирующих воздействий (скачок, импульс);
- е) ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называется структурной схемой? Какие задачи можно решить с её помощью?
2. Как может быть составлена структурная схема?
3. Что позволяет алгоритмизировать процесс упрощения структурной схемы? Поясните на конкретном примере.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО УРАВНЕНИЮ ДИНАМИКИ**

**Цель работы:** овладение навыками анализа устойчивости систем управления различным компьютерным инструментарием.

Важнейшей задачей анализа систем управления является решение вопроса об их устойчивости. Техническое понятие устойчивости систем автоматического управления отражает свойство технической системы стабильно работать в нормальных режимах. При отклонении всевозможных параметров системы от номинала и влиянии на систему дестабилизирующих воздействий, т.е. способности системе возвращаться к равновесному состоянию, из которого она выводится возмущающими или управляющими воздействиями. Устойчивость системы - техническое требование в ряду более сложных требований, связанных с показателями качества и точности системы автоматического управления (САУ). Понятие устойчивости системы. Система находится в состоянии равновесия, если при отсутствии воздействия на систему возмущающих факторов ошибка регулирования (разность между заданным и фактическим состоянием системы) стремится к нулю. Под устойчивостью понимается способность динамической системы возвращаться в равновесное состояние после окончания действия возмущения, нарушившего это равновесие. Неустойчивая система после воздействия возмущения удаляется от равновесного состояния или начинает совершать вокруг него колебания с нарастающей амплитудой.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Запустить систему MATLAB
2. Создать ss-объект, в соответствии с выбранным вариантом
3. Определить устойчивость системы
4. Построить графики, отражающие устойчивость систем управления.
5. Оформить отчет



**Методический пример:**

Задана система управления, описываемая конечно-разностными уравнениями в пространстве состояний

$$x(k+1) = A(k) x(k) + B(k) u(k), \quad (k = \overline{0, N}),$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -3 & 4 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

и известна матрица  $K$ , определяющая закон

$$\text{управления } u = Kx, \quad K = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

1. Зададим матрицы, определяющие систему:

```
>> A=[1 2; -3 4]
```

```
A =
```

```
1 2
```

```
-3 4
```

```
>> B = [1 2]'
```

```
B =
```

```
1
```

```
2
```

```
>> L=[2 1]
```

```
L =
```

```
2 1
```

2. Определим решение уравнения Ляпунова

```
>> G=dlyap(A, eye(2))
```

```
G =
```

```
-0.2211 -0.1215
```

```
-0.1215 -0.1285
```

3. Произведем расчет главных миноров

```
>> det(G(1:1, 1:1))
```

```
ans =
```

```
-0.2211
```

```
>> det(G)
```

```
ans =
```

```
0.0136
```

По критерию Сильвестра решение не является положительно-определенной матрицей, следовательно, система не является

асимптотически устойчивой. График свободного движения системы при начальных условиях  $x = (x_1, x_2) = (2, 1)$  показан на рис. 4.1 и 4.2.

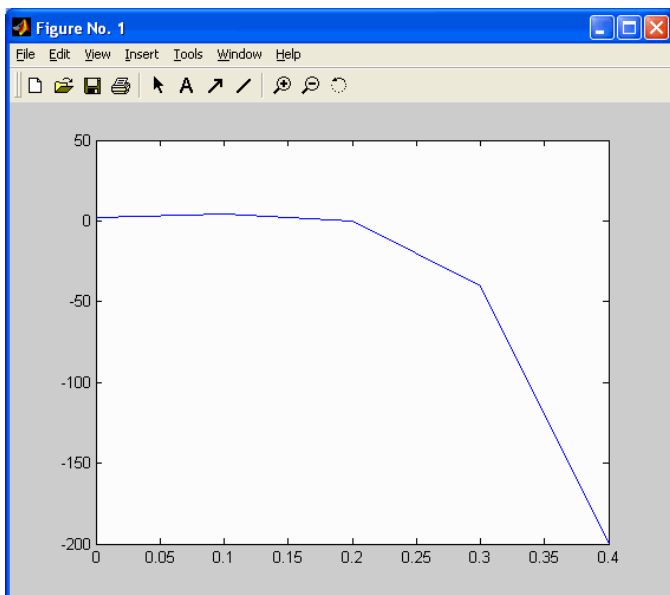


Рис. 4.1.  $x_1(k)$ .

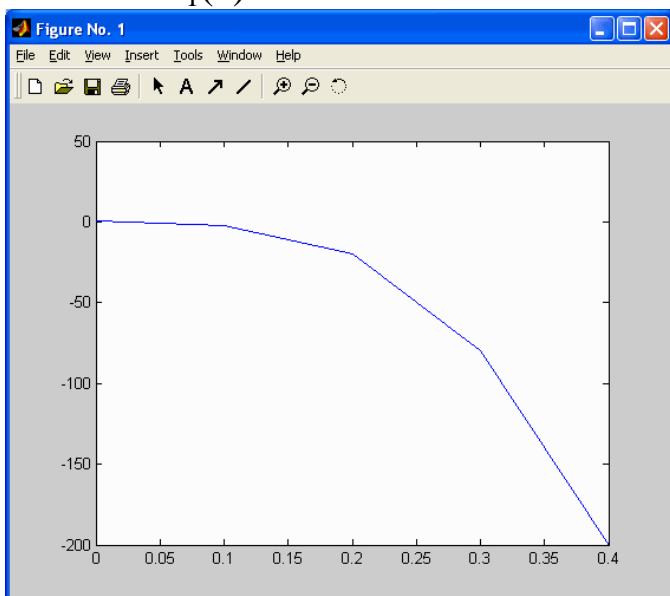


Рис. 4.2.  $x_2(k)$ .

4. Аналогично можно определить свойство асимптотической устойчивости в управляемой системе.

```
>> G=dlyap(A+B*L, eye(2))
```

```
G =
```

```
-0.2563  0.0833
```

```
0.0833  -0.0498
```

```
>> det(G)
```

```
ans =
```

```
0.0058
```

```
>> det(G(1:1, 1:1))
```

```
ans =
```

```
-0.2563
```

По критерию Сильвестра решение дискретного уравнения Ляпунова не является положительно-определенной матрицей, следовательно, система не является устойчивой.

### Варианты заданий

№	Уравнения систем	L
1	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 5 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 2 & 2 \end{pmatrix}$
2	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 & 5 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$
3	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 7 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$
4	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 2 & 1 \end{pmatrix}$
5	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} -2 & 1 \end{pmatrix}$
6	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} -0.2 & -1 \end{pmatrix}$
7	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 3 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} -4 & -3 \end{pmatrix}$
8	$\dot{x} = \begin{pmatrix} -7 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$
9	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 5 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -1 \\ -3 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 32 & 10 \end{pmatrix}$
10	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & -2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 7 & 9 \end{pmatrix}$
11	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} 3 & -8 \end{pmatrix}$
12	$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 9 & 2 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 1 & 5 \\ -2 & 1 \end{pmatrix}u$	$\begin{pmatrix} -7 & 0 \\ 0 & -7 \end{pmatrix}$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САУ БТС

**Цель работы:** Ознакомление с динамическими и частотными характеристиками систем автоматического управления (САУ) и получение навыков исследования линейных динамических моделей.

### Постановка задачи

В качестве объекта исследования выступают линейные (линеаризованные) динамические стационарные системы управления с одним входом и одним выходом. При этом модель одномерной САУ задана в виде комплексной передаточной функции, записанной как отношение полиномов

$$W(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}.$$

Необходимо:

1. Определить полюса и нули передаточной функции  $s_j^*, (i = \overline{1, n})$ ,  $s_j^0, (j = \overline{1, m})$ .
2. Записать дифференциальное уравнение, определяющее функционирование САУ.
3. Построить графики переходной и импульсно-переходной функции:  $h(t)$ ,  $w(t)$ .
4. Построить логарифмические частотные характеристики  $L(w)$ . Построить частотный годограф Найквиста  $W(iw)$ ,  $w = [0, \infty]$ .
5. Представить исходную систему в виде последовательного соединения типовых звеньев. Построить характеристики этих типовых звеньев.

### Краткие теоретические сведения

Рассмотрим систему автоматического управления (САУ), описываемую линейным (линеаризованным) дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned}
 a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\
 = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t), \quad (1.1)
 \end{aligned}$$

где  $u(t)$  – входной процесс,  $y(t)$  – выходной процесс,  $a_i, b_j$ , ( $i = \overline{0, n}, j = \overline{0, m}$ ) – постоянные коэффициенты,  $n, m$  ( $n \geq m$ ) – постоянные числа. В операторной форме выражение (1.1) может быть записано –

$$A(D)y(t) = B(D)u(t).$$

Здесь  $D$  – оператор дифференцирования  $\left( D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{dt} \right)$ . Отсюда преобразование “вход-выход” системы –

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B(D)}{A(D)} = W(D), \quad (1.2)$$

где  $W(D)$  называется операторной передаточной функцией.

Один из способов моделирования систем заключается в представлении преобразования “вход-выход” в виде комплексной передаточной функции:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = W(s), \quad (1.3)$$

которая получается путем применения преобразования Лапласа к (1.2) при начальных нулевых условиях. Здесь  $s$ -комплексная переменная. Связь между операторной (1.2) и комплексной (1.3) передаточными функциями можно записать в виде

$$W(s) = W(D)|_{D=s}.$$

Комплексные числа, являющиеся корнями многочлена  $B(s)$ , называются нулями передаточной функции, а корни многочлена  $A(s)$  – полюсами.

Явный вид связи входа и выхода определяется выражением:

$$y(t) = \int_0^t w(t-\tau)v(\tau)d\tau, \quad (1.4)$$

где  $w(t)$  – оригинал (т.е. полученный с помощью обратного преобразования Лапласа) комплексной передаточной функции  $W(s)$ .

Динамические свойства систем характеризуют реакции на входные воздействия специального вида. В частности анализ выхода системы на единичный скачок и  $\delta$ -функцию (дельта-функцию).

Пусть  $u(t) = 1(t)$ , то есть на вход системы подается функция Хевисайда (единичный скачок), определяемая

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq 0, \\ 1, & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

График функции Хевисайда приведен на рис. 1.1. Реакция САУ на единичный скачок называется переходной функцией системы и обозначается  $h(t)$ .

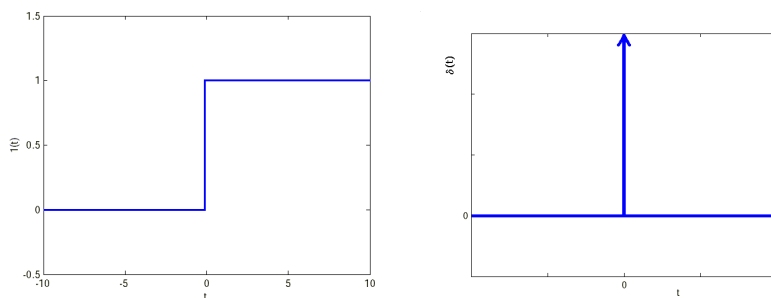


Рис. 1.1. Функция Хевисайда. Рис. 1.2. Функция Дирака.

Если  $u(t) = \delta(t)$ , то есть на вход системы поступает функция Дирака ( $\delta$ -функция, импульсная функция, рис. 1.2) определяемая

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0, \\ 0, & \text{при } t \neq 0, \end{cases}$$

то реакция САУ называется импульсной переходной функцией системы и обозначается  $w(t)$ . Таким образом оригинал комплексной передаточной функции можно измерить как реакцию систему на импульс.

Импульсная и переходная функции системы связаны соотношением (из (1.4)):

$$h(t) = \int_0^t w(\tau) d\tau$$

Благодаря широкому применению при исследовании устойчивости динамических систем и проектировании

регуляторов получили распространение частотные характеристики.

Пусть на вход системы с передаточной функцией  $W(s)$  подается гармонический сигнал

$$u(t) = a_u \cos(\omega t), t > 0. \quad (1.5)$$

В этих условиях справедлива следующая теорема:

Если звено является устойчивым, то установившаяся реакция  $y(t)$  на гармоническое воздействие является функцией той же частоты с амплитудой

$$a_y = a_u |W(i\omega)|,$$

и относительным сдвигом по фазе

$$\varphi = \arg W(i\omega).$$

Таким образом, выход определяется гармонической функцией

$$y(t) = a_u |W(i\omega)| \cos(\omega t + \arg W(i\omega)),$$

где  $i$  – комплексная единица ( $i^2 = -1$ ),  $W(i\omega) = W(s)|_{s=i\omega}$  – частотная характеристика.

Частотной характеристикой  $W(i\omega)$  стационарной динамической системы называется преобразование Фурье переходной функции:

$$W(i\omega) = F[h(t, \tau)] = \int_0^{\infty} w(t - \tau) e^{-i\omega(t - \tau)} d\tau,$$

где  $w(t - \tau)$  – импульсная переходная функция.

Связь между комплексной передаточной функцией и частотной характеристикой, исходя из свойств преобразований Фурье можно представить в виде соотношения:

$$W(s)|_{s=i\omega} = W(i\omega).$$

При фиксированном значении  $\omega$  частотная характеристика является комплексным числом, и, следовательно, может быть представлена в виде

$$W(i\omega) = A(\omega) e^{i\psi(\omega)} = U(\omega) + iV(\omega).$$

Здесь

$A(\omega) = |W(i\omega)|$  – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\psi(\omega) = \arg W(i\omega)$  – фазово-частотная характеристика (ФЧХ);

$U(\omega) = \operatorname{Re} W(i\omega)$  – вещественная частотная характеристика (ВЧХ);

$V(\omega) = \operatorname{Im} W(i\omega)$  – мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Геометрическое место точек  $W(i\omega)$  на комплексной плоскости при изменении  $\omega$  от  $\omega_0$  до  $\omega_1$  (обычно  $\omega_0 = 0$ ,  $\omega_1 = \infty$ ), называется амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ) или частотным годографом Найквиста.

Имеет широкое практическое значение диаграмма Боде (логарифмическая амплитудная характеристика, ЛАХ), которая определяется как  $L = 20 \lg A(\omega)$ , измеряется в децибелах и строится как функция от  $\lg \omega$ .

### **Порядок выполнения работы.**

Для выполнения лабораторной работы используется пакет прикладных программ (ППП) Control System Toolbox. ППП предназначен для работы с LTI-моделями (Linear Time Invariant Models) систем управления.

В Control System Toolbox имеется тип данных, определяющих динамическую систему в виде комплексной передаточной функции. Синтаксис команды, создающий LTI-систему с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции:

$TF([b_m, \dots, b_1, b_0], [a_n, \dots, a_1, a_0])$

$b_m, \dots, b_1$  – значения коэффициентов полинома  $B$  в (1.3),

$a_n, \dots, a_1$  – значения коэффициентов полинома  $A$  в (1.3).

Для выполнения работы могут применяться команды, приведенные в таблице 1.1.

*Таблица 1.1. Некоторые команды*

### *Control System Toolbox*

Синтаксис	Описание
pole(<LTI-объект>)	Вычисление полюсов передаточной функции
zero(<LTI-объект>)	Вычисление нулей передаточной функции
step(<LTI-объект>)	Построение графика переходного процесса
impulse(<LTI-объект>)	Построение графика импульсной переходной функции
bode(<LTI-объект>)	Построение логарифмических частотных характеристик (диаграммы Боде)
nyquist(<LTI-объект>)	Построение частотного годографа Найквиста



Для определения корней полиномов степени  $k$ , может, также, применяться команда MATLAB

`roots(P)`,

которая, в качестве аргумента  $P$ , получает матрицу коэффициентов полинома  $[p_k, \dots, p_0]$ .

Другим вариантом получения графиков динамических характеристик САУ является использование графического интерфейса ППП CST – LTI viewer, вызов которого осуществляется командой

`ltiview`

которой, в качестве параметра, можно указать имя переменной, содержащей LTI-объект.

Таким образом, выполнение лабораторной работы состоит из следующих шагов:

Изучить теоретические сведения.

Запустить систему MATLAB.

Создать tf-объект, в соответствии с заданным вариантом.

Составить дифференциальное уравнение, определяющее функционирование САУ.

Определить полюса передаточной функции  $s_j^*$ , ( $i = \overline{1, n}$ ) с использованием команды `roots` или `pole`.

Определить нули передаточной функции  $s_j^0$ , ( $j = \overline{1, m}$ ) с использованием команды `roots` или `zero`.

Используя LTI-viewer, или соответствующие команды (табл.1) получить динамические характеристики – переходную функцию  $h(t)$ , импульсно-переходную функцию  $w(t)$  и частотные характеристики – диаграмму Боде, частотный годограф Найквиста.

Получить представление исходной функции в виде произведения типовых звеньев.

Ответить на контрольные вопросы.

Оформить отчет.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оформлению лабораторных работ в вузе, и

должен содержать титульный лист, формулировку цели работы, постановку задачи в соответствии с вариантом задания, результаты работы, выводы.

Примечание: Варианты заданий, состоят из двух цифр: первая - номер передаточной функции, вторая – номер набора значений коэффициентов.

### **Контрольные вопросы**

1. Представьте систему в виде последовательного соединения типовых звеньев.
2. Дайте определение и поясните физический смысл переходной функции.
3. Представьте исходную систему в пространстве состояний.
4. Найдите передаточную функцию замкнутой системы.
5. Постройте динамические характеристики типовых звеньев.
6. Определите вид ЛЧХ для пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЙ «ВХОД»-«ВЫХОД» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

**Цель работы:** овладения знаниями и навыками в области проведения разведочного анализа, синтеза математических моделей статических и динамических объектов (процессов) типа «вход-выход», типичных для кибернетического анализа, на основе результатов мониторинга.

### **Краткие теоретические сведения.**

Модель - это объект-заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала. Замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется моделированием. Под математическим моделированием будем понимать процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и задач исследования объекта и требуемой достоверности и точности решения этой задачи.

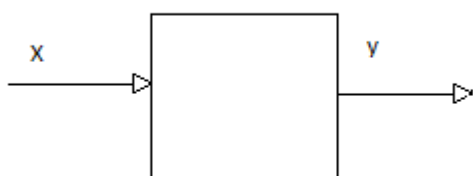
Основные этапы построения математической модели:

- Формулировка проблемы
- Формализация
- Постановка целей и задач моделирования
- Выбор численного аппарата и проведение вычислений/решение уравнений
- Отладка и корректировка модели
- Оценка точности и интерпритация результатов
- Комплексирование (встраивание решений в старые системы)
- Требования к математической модели

Адекватность- способность отображать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной. Точность- оценивается степенью совпадения значений параметров действительного объекта и рассчитанных на математических моделях. Универсальность - характеризует полноту отображения в модели свойств реального объекта. Экономичность- обычно характеризуется необходимыми затратами машинной памяти и времени. Иногда оценивается по количеству операций необходимых при одном обращении к модели.

Требования универсальности, точности, адекватности с одной стороны и экономичности с другой противоречивы. Это обуславливает работу целого спектра моделей отличающихся теми или иными свойствами.

Уравнение <вход-выход>



---


$$M=f(x, y)$$

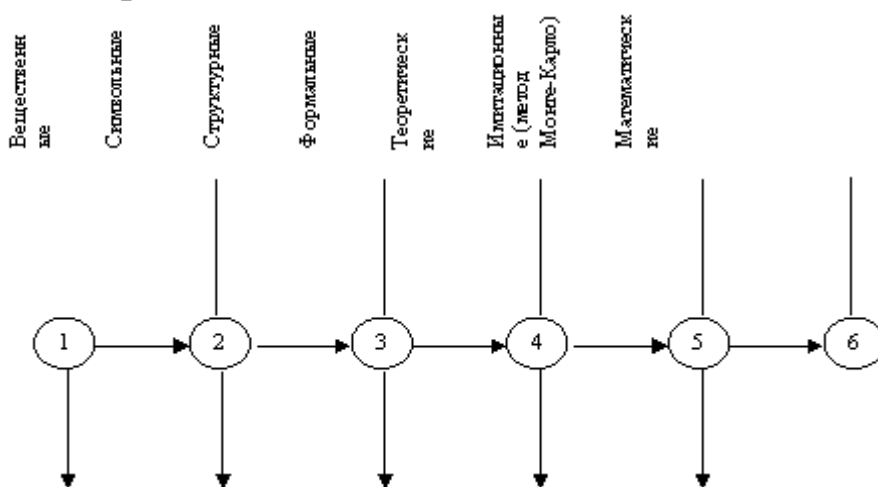
Задачи у моделирования могут быть разными:

- По известным  $x$  и  $M$  найти  $y$ , решением чего будет  $y=f^{-1}(x)$  - прямая задача
- По известным  $y$ ,  $M$  найти входные данные  $x$ , решением чего будет  $x=f^{-1}(y)$  - обратная задача
- По известным  $x$  и  $y$  найти  $M$  - задача настройки модели.

Первые две задачи - задачи белого ящика, т.е. мы знаем, как функционирует исследуемая система

Последняя задача - задача черного ящика, которая с помощью гипотез сводится к задаче серого ящика (мы знаем как примерно функционирует часть системы, которой достаточно для получения адекватных результатов моделирования).

## Классификация моделей



### Классификация моделей

*Формальная классификация моделей.* Формальная классификация моделей основывается на классификации используемых математических средств. Часто строится в форме дихотомий. Например, один из популярных наборов дихотомий :

- Линейные или нелинейные модели;
- Сосредоточенные или распределённые системы;
- Детерминированные или стохастические;
- Статические или динамические;
- Дискретные или непрерывные .

и так далее.

Каждая построенная модель является линейной или нелинейной, детерминированной или стохастической, Естественно, что возможны и смешанные типы: в одном отношении сосредоточенные (по части параметров), в другом - распределённые модели и т. д. Классификация по способу представления объекта. Наряду с формальной классификацией, модели различаются по способу представления объекта: структурные или функциональные модели. Структурные модели представляют объект как систему со своим устройством и механизмом функционирования. Функциональные модели не используют таких представлений и отражают только внешне воспринимаемое поведение (функционирование) объекта. В их

предельном выражении они называются также моделями «чёрного ящика». Возможны также комбинированные типы моделей, которые иногда называют моделями «серого ящика». Содержательные и формальные модели. Практически все авторы, описывающие процесс математического моделирования, указывают, что сначала строится особая идеальная конструкция, содержательная модель[. Устоявшейся терминологии здесь нет, и другие авторы называют этот идеальный объект концептуальная модель, умозрительная модель или предмодель. При этом финальная математическая конструкция называется формальной моделью или просто математической моделью, полученной в результате формализации данной содержательной модели (предмодели). Построение содержательной модели может производиться с помощью набора готовых идеализаций, как в механике, где идеальные пружины, твёрдые тела, идеальные маятники, упругие среды и т. п. дают готовые структурные элементы для содержательного моделирования. Однако в областях знания, где не существует полностью завершённых формализованных теорий (передний край физики, биологии, экономики, социологии, психологии, и большинства других областей), создание содержательных моделей резко усложняется.

#### Содержательная классификация моделей

В работе Р. Пайерлса дана классификация математических моделей, используемых в физике и, шире, в естественных науках. В книге А. Н. Горбаня и Р. Г. Хлебопроста эта классификация проанализирована и расширена. Эта классификация сфокусирована, в первую очередь, на этапе построения содержательной модели.

*Тип 1: Гипотеза (такое могло бы быть)* Эти модели «представляют собой пробное описание явления, причем автор либо верит в его возможность, либо считает даже его истинным». По Р. Пайерлсу это, например, модель Солнечной системы по Птолемею и модель Коперника (усовершенствованная Кеплером), модель атома Резерфорда и модель Большого Взрыва.

Никакая гипотеза в науке не бывает доказана раз и навсегда. Очень чётко это сформулировал Ричард Фейнман: «У нас всегда

есть возможность опровергнуть теорию, но, обратите внимание, мы никогда не можем доказать, что она правильна. Предположим, что вы выдвинули удачную гипотезу, рассчитали, к чему это ведет, и выяснили, что все ее следствия подтверждаются экспериментально. Значит ли это, что ваша теория правильна? Нет, просто-напросто это значит, что вам не удалось ее опровергнуть.»

Если модель первого типа построена, то это означает что она временно признаётся за истину и можно сконцентрироваться на других проблемах. Однако это не может быть точкой в исследованиях, но только временной паузой: статус модели первого типа может быть только временным.

*Тип 2: Феноменологическая модель (ведем себя так, как если бы...).* Феноменологическая модель содержит механизм для описания явления. Однако этот механизм недостаточно убедителен, не может быть достаточно подтверждён имеющимися данными или плохо согласуется с имеющимися теориями и накопленным знанием об объекте. Поэтому феноменологические модели имеют статус временных решений. Считается, что ответ всё ещё неизвестен и необходимо продолжить поиск «истинных механизмов». Ко второму типу Пайерлс относит, например, модели теплорода и кварковую модель элементарных частиц.

Роль модели в исследовании может меняться со временем, может случиться так, что новые данные и теории подтвердят феноменологические модели и те будут повышены до статуса гипотезы. Аналогично, новое знание может постепенно прийти в противоречие с моделями-гипотезами первого типа и те могут быть переведены во второй. Так, кварковая модель постепенно переходит в разряд гипотез; атомизм в физике возник как временное решение, но с ходом истории перешёл в первый тип. А вот модели эфира, проделали путь от типа 1 к типу 2, а сейчас находятся вне науки. Идея упрощения очень популярна при построении моделей. Но упрощение бывает разным. Пайерлс выделяет три типа упрощений в моделировании.

*Тип 3: Приближение (что-то считаем очень большим или очень малым).* Если можно построить уравнения, описывающие исследуемую систему, то это не значит, что их можно решить даже с помощью компьютера. Общепринятый прием в этом случае — использование приближений (моделей типа 3). Среди них модели линейного отклика. Уравнения заменяются линейными. Стандартный пример — закон Ома.

Если мы используем модель идеального газа для описания достаточно разреженных газов, то это — модель типа 3 (приближение). При более высоких плотностях газа тоже полезно представлять себе более простую ситуацию с идеальным газом для качественного понимания и оценок, но тогда это уже тип 4.

*Тип 4: Упрощение (опустим для ясности некоторые детали)* В модели типа 4 отбрасываются детали, которые могут заметно и не всегда контролируемо повлиять на результат. Одни и те же уравнения могут служить моделью типа 3 (приближение) или 4 (опустим для ясности некоторые детали) — это зависит от явления, для изучения которого используется модель. Так, если модели линейного отклика применяются при отсутствии более сложных моделей (то есть не производится линеаризация нелинейных уравнений, а просто ищутся линейные уравнения, описывающие объект), то это уже феноменологические линейные модели, и относятся они к следующему типу 4 (все нелинейные детали «для ясности» опускаем).

Примеры: применение модели идеального газа к неидеальному, уравнение состояния Ван-дер-Ваальса, большинство моделей физики твердого тела, жидкостей и ядерной физики. Путь от микроописания к свойствам тел (или сред), состоящих из большого числа частиц, очень длинен. Приходится отбрасывать многие детали. Это приводит к моделям 4-го типа.

*Тип 5: Эвристическая модель (количественного подтверждения нет, но модель способствует более глубокому проникновению в суть дела).* Эвристическая модель сохраняет лишь качественное подобие реальности и даёт предсказания только «по порядку величины». Типичный пример - приближение



средней длины свободного пробега в кинетической теории. Оно даёт простые формулы для коэффициентов вязкости, диффузии, теплопроводности, согласующиеся с реальностью по порядку величины.

Но при построении новой физики далеко не сразу получается модель, дающая хотя бы качественное описание объекта - модель пятого типа. В этом случае часто используют модель по аналогии, отражающую действительность хоть в какой-нибудь черте.

*Тип 6: Аналогия (учтём только некоторые особенности).*

Р. Пайерлс приводит историю использования аналогий в первой статье В. Гейзенберга о природе ядерных сил. «Это произошло после открытия нейтрона, и хотя сам В. Гейзенберг понимал, что можно описывать ядра состоящими из нейтронов и протонов, он не мог все же избавиться от мысли, что нейтрон должен в конечном счете состоять из протона и электрона. При этом возникала аналогия между взаимодействием в системе нейтрон — протон и взаимодействием атома водорода и протоном. Позднее было все-таки доказано существование обменных сил взаимодействия между нейтроном и протоном, хотя ими не исчерпывалось полностью взаимодействие между двумя частицами. Но, следуя все той же аналогии, В. Гейзенберг пришёл к заключению об отсутствии ядерных сил взаимодействия между двумя протонами и к постулированию отталкивания между двумя нейтронами. Оба последних вывода находятся в противоречии с данными более поздних исследований».

*Тип 7: Мысленный эксперимент (главное состоит в опровержении возможности).* А. Эйнштейн был одним из великих мастеров мысленного эксперимента. Вот один из его экспериментов. Он был придуман в юности и, в конце концов, привел к построению специальной теории относительности. Предположим, что в классической физике мы движемся за световой волной со скоростью света. Мы будем наблюдать периодически меняющееся в пространстве и постоянное во времени электромагнитное поле. Согласно уравнениям

Максвелла, этого быть не может. Отсюда юный Эйнштейн заключил: либо законы природы меняются при смене системы отсчета, либо скорость света не зависит от системы отсчета. Он выбрал второй - более красивый вариант. Другой знаменитый мысленный эксперимент Эйнштейна - Парадокс Эйнштейна - Подольского - Розена.

Тип 8, широко распространенный в математических моделях биологических систем.

*Тип 8: Демонстрация возможности (главное — показать внутреннюю непротиворечивость возможности)*  
 Это тоже мысленные эксперименты с воображаемыми сущностями, демонстрирующие, что предполагаемое явление согласуется с базовыми принципам и внутренне непротиворечиво. В этом основное отличие от моделей типа 7, которые вскрывают скрытые противоречия.

Один из самых знаменитых таких экспериментов - геометрия Лобачевского (Лобачевский называл её «воображаемой геометрией»). Другой пример - массовое производство формально - кинетических моделей химических и биологических колебаний, автоволн и др. Парадокс Эйнштейна - Подольского - Розена был задуман как модель 7 типа, для демонстрации противоречивости квантовой механики. Совершенно незапланированным образом он со временем превратился в модель 8 типа - демонстрацию возможности квантовой телепортации информации.

В основе содержательной классификации лежат этапы, предшествующие математическому анализу и вычислениям. Восемь типов моделей по Р. Пайерлсу суть восемь типов исследовательских позиций при моделировании.

**ПРИМЕР.** Рассмотрим механическую систему, состоящую из пружины, закрепленной с одного конца, и груза массой  $m$ , прикрепленного к свободному концу пружины. Будем считать, что груз может двигаться только в направлении оси пружины (например, движение происходит вдоль стержня). Построим математическую модель этой системы. Будем описывать состояние системы расстоянием  $x$  от центра груза до его

положения равновесия. Опишем взаимодействие пружины и груза с помощью закона Гука ( $F = -kx$ ) после чего воспользуемся вторым законом Ньютона, чтобы выразить его в форме дифференциального уравнения:  $m\ddot{x} = -kx$ , где  $\ddot{x}$  означает вторую

производную от  $x$  по времени:  $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ .

Полученное уравнение описывает математическую модель рассмотренной физической системы. Эта модель называется «гармоническим осциллятором». По формальной классификации эта модель линейная, детерминисткая, динамическая, сосредоточенная, непрерывная. В процессе её построения мы сделали множество допущений (об отсутствии внешних сил, отсутствии трения, малости отклонений и т. д.), которые в реальности могут не выполняться.

По отношению к реальности это, чаще всего, модель типа 4 упрощение («опустим для ясности некоторые детали»), поскольку опущены некоторые существенные универсальные особенности (например, диссипация). В некотором приближении (скажем, пока отклонение груза от равновесия невелико, при малом трении, в течение не слишком большого времени и при соблюдении некоторых других условий), такая модель достаточно хорошо описывает реальную механическую систему, поскольку отброшенные факторы оказывают пренебрежимо малое влияние на её поведение. Однако модель можно уточнить, приняв во внимание какие-то из этих факторов. Это приведет к новой модели, с более широкой (хотя и снова ограниченной) областью применимости.

Впрочем, при уточнении модели сложность её математического исследования может существенно возрасти и сделать модель фактически бесполезной. Зачастую более простая модель позволяет лучше и глубже исследовать реальную систему, чем более сложная (и, формально, «более правильная»).

Если применять модель гармонического осциллятора к объектам, далёким от физики, её содержательный статус может быть другим. Например, при приложении этой модели к

биологическим популяциям, её следует отнести, скорее всего, к типу 6 аналогия («учтём только некоторые особенности»).

Жёсткие и мягкие модели. Гармонический осциллятор - пример так называемой «жёсткой» модели. Она получена в результате сильной идеализации реальной физической системы. Для решения вопроса о её применимости необходимо понять, насколько существенными являются факторы, которыми мы пренебрегли. Иными словами, нужно исследовать «мягкую» модель, получающуюся малым возмущением «жёсткой». Она может задаваться, например, следующим уравнением:  $m\ddot{x} = -kx + \varepsilon f(x, \dot{x})$ , Здесь  $f(x, \dot{x})$  — некоторая функция, в которой может учитываться сила трения или зависимость коэффициента жёсткости пружины от степени её растяжения,  $\varepsilon$  - некоторый малый параметр. Явный вид функции  $f$  нас в данный момент не интересует. Если мы докажем, что поведение мягкой модели принципиально не отличается от поведения жёсткой (вне зависимости от явного вида возмущающих факторов, если они достаточно малы), задача сведется к исследованию жёсткой модели. В противном случае применение результатов, полученных при изучении жёсткой модели, потребует дополнительных исследований. Например, решением уравнения гармонического осциллятора являются функции вида  $x(t) = A \sin \sqrt{k}t + B \cos \sqrt{k}t$ , то есть колебания с постоянной амплитудой. Следует ли из этого, что реальный осциллятор будет бесконечно долго колебаться с постоянной амплитудой? Нет, поскольку рассматривая систему со сколь угодно малым трением (всегда присутствующим в реальной системе), мы получим затухающие колебания. Поведение системы качественно изменилось.

Если система сохраняет свое качественное поведение при малом возмущении, говорят, что она структурно устойчива. Гармонический осциллятор — пример структурно-неустойчивой (негрубой) системы. Тем не менее, эту модель можно применять для изучения процессов на ограниченных промежутках времени.

Универсальность моделей. Важнейшие математические модели обычно обладают важным свойством универсальности: принципиально разные реальные явления могут описываться одной и той же математической моделью. Скажем, гармонический осциллятор описывает не только поведение груза на пружине, но и другие колебательные процессы, зачастую имеющие совершенно иную природу: малые колебания маятника, колебания уровня жидкости в U-образном сосуде или изменение силы тока в колебательном контуре. Таким образом, изучая одну математическую модель, мы изучаем сразу целый класс описываемых ею явлений. Именно этот изоморфизм законов, выражаемых математическими моделями в различных сегментах научного знания, подвиг Людвига фон Берталанфи на создание «Общей теории систем».

Прямая и обратная задачи математического моделирования. Существует множество задач, связанных с математическим моделированием. Во-первых, надо придумать основную схему моделируемого объекта, воспроизвести его в рамках идеализаций данной науки. Так, вагон поезда превращается в систему пластин и более сложных тел из разных материалов, каждый материал задается как его стандартная механическая идеализация (плотность, модули упругости, стандартные прочностные характеристики), после чего составляются уравнения, по дороге какие-то детали отбрасываются, как несущественные, производятся расчёты, сравниваются с измерениями, модель уточняется, и так далее. Однако для разработки технологий математического моделирования полезно разобрать этот процесс на основные составные элементы.

Традиционно выделяют два основных класса задач, связанных с математическими моделями: прямые и обратные.

*Прямая задача:* структура модели и все её параметры считаются известными, главная задача — провести исследование модели для извлечения полезного знания об объекте. Какую статическую нагрузку выдержит мост? Как он будет реагировать на динамическую нагрузку (например, на марш роты солдат, или на прохождение поезда на различной скорости), как самолёт

преодолеет звуковой барьер, не развалится ли он от флаттера, - вот типичные примеры прямой задачи. Постановка правильной прямой задачи (задание правильного вопроса) требует специального мастерства. Если не заданы правильные вопросы, то мост может обрушиться, даже если была построена хорошая модель для его поведения. Так, в 1879 г. в Великобритании обрушился металлический мост через реку Тей, конструкторы которого построили модель моста, рассчитали его на 20-кратный запас прочности на действие полезной нагрузки, но забыли о постоянно дующих в тех местах ветрах. И через полтора года он рухнул.

В простейшем случае (одно уравнение осциллятора, например) прямая задача очень проста и сводится к явному решению этого уравнения.

*Обратная задача:* известно множество возможных моделей, надо выбрать конкретную модель на основании дополнительных данных об объекте. Чаще всего, структура модели известна, и необходимо определить некоторые неизвестные параметры. Дополнительная информация может состоять в дополнительных эмпирических данных, или в требованиях к объекту (задача проектирования). Дополнительные данные могут поступать независимо от процесса решения обратной задачи (пассивное наблюдение) или быть результатом специально планируемого в ходе решения эксперимента (активное наблюдение).

Одним из первых примеров виртуозного решения обратной задачи с максимально полным использованием доступных данных был построенный И. Ньютоном метод восстановления сил трения по наблюдаемым затухающим колебаниям. В качестве другого примера можно привести математическую статистику. Задача этой науки - разработка методов регистрации, описания и анализа данных наблюдений и экспериментов с целью построения вероятностных моделей массовых случайных явлений. Т.е. множество возможных моделей ограничено вероятностными моделями. В конкретных задачах множество моделей ограничено сильнее.

Компьютерные системы моделирования. Для поддержки математического моделирования разработаны системы компьютерной математики, например, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, VisSim и др. Они позволяют создавать формальные и блочные модели как простых, так и сложных процессов и устройств и легко менять параметры моделей в ходе моделирования. Блочные модели представлены блоками (чаще всего графическими), набор и соединение которых задаются диаграммой модели.

Для решения задач САУ (анализ системы или синтез системы) нужно получить математическое описание системы (математическую модель системы) – дифференциальное уравнение физического закона.

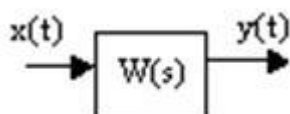
Получение модели начинается с разбиения системы на звенья направленного действия - передают сигнал в одном направлении, и изменение звена не влияет на состояние предшествующего звена, работающего на его вход. Разбиение системы на звенья производится исходя из простоты их дифф. уравнений (не выше 2 порядка). Затем для каждого звена составляется передаточная функция.

Математическое описание системы – это либо система из  $n$  дифференциальных уравнений 1 порядка, либо дифференциальное уравнение  $n$  порядка. После составления дифференциального уравнения на основании преобразования Лапласа составляют передаточную функцию.

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x + z(t)$$

Или в операторном виде через преобразование Лапласа:  
 $A(s)Y(s) = B(s)X(s)$

$\Phi(s) = Y(s)/X(s) = B(s)/A(s)$  – передаточная функция (описание в системе вход – выход)



$$F(x) = F(x_0) + \frac{dF}{dx} \cdot \Delta x$$

$$\Delta y = k * \Delta x$$

Если использовать преобразование Лапласа, то получим передат. функцию.  $W(s) = Y(s)/X(s)$

Схема, составленная из звеньев направленного действия, называется структурно-динамической – составляется на основании передаточных функций каждого звена.

Для решения задач САУ (анализ системы или синтез системы) нужно получить математическое описание системы (математическую модель системы).

Получение модели начинается с разбиения системы на звенья по математическому описанию, причем звенья направленного действия передают сигнал в одном направлении и изменение состояния этого звена не влияет на состояние предшествующего звена, работающего на его вход. Для каждого звена записываются физические законы, которые лежат в основе его функционирования.

В общем случае . получается дифференциальное уравнение N-ого порядка.

Если учитывать все факторы, то уравнение получится нелинейное.

### **Виды мониторинга**

**Классификация видов мониторинга.** В основу классификации видов мониторинга могут быть положены разные основания, к числу которых относятся: цели проведения мониторинга; его основные функции; область применения данных; инструментарий; модель или технология проведения мониторинга и др.

Чаще всего классификация видов мониторинга проводится в соответствии с его основными функциями: информационной, диагностической, сравнительной и прогностической.

**Информационный мониторинг.** Проведение информационного мониторинга нацелено на сбор, накопление, анализ, структуризацию и интерпретацию данных по выделенной совокупности показателей при условии, что анализ носит не сопоставительный или прогностический, а констатирующий характер. Отличительной чертой информационного мониторинга является отсутствие анализа эффектов связи и взаимного влияния показателей, сопоставления результатов мониторинга на различных уровнях управ-



ления качеством образования, выявления тенденций в образовании и прогнозирования их влияния на качество образования.

В рамках информационного мониторинга анализ направлен на выявление степени согласованности данных с некоторыми нормами и стандартами. Например, анализ данных мониторинга аттестационного тестирования выпускников школ нацелен на установление соответствия учебных достижений выпускников требованиям ГОС. При анализе таких данных следует принимать во внимание средние размеры классов по школам внутри района, количество учащихся, приходящихся на одного преподавателя в школе, ежегодные расходы на учебные материалы, размер библиотечных фондов, данные о квалификации преподавателей в школах, число сотрудников вспомогательного состава и т.д. Эти и другие данные в усредненном виде могут быть отнесены к некоторым районным или областным стандартам школьного образования.

**Диагностический мониторинг.** Диагностический мониторинг предназначен для определения того, как справляются с различными темами или разделами учебного плана большинство учащихся. Диагностический мониторинг может проводиться на различных уровнях. Преподаватели выявляют проблемы усвоения учебного материала и осуществляют деятельность по диагностическому мониторингу на уровне класса. В районе диагностические системы мониторинга нацелены на определение отдельных слабо усвоенных умений и навыков.

Сбор данных для диагностического мониторинга обычно проводится с помощью педагогических измерений. В качестве основного инструментария используются корректирующие критериально-ориентированные тесты, которые сопровождаются диагностическими тестами для установления причин пробелов в усвоении учебного материала.

В диагностическом мониторинге не учитываются входные характеристики учащихся, поскольку главная его цель состоит в том, чтобы идентифицировать сильные и слабые стороны в учебных достижениях и образовательной деятельности независимо от характеристик учащихся и их возможностей

усвоения материала. Поэтому данные диагностического мониторинга не используют для проведения сравнений между школами или районами.

**Сравнительный мониторинг.** Сравнительный мониторинг отличается от других видов мониторинга специфическим анализом данных, который направлен на сопоставление количественных оценок по совокупности показателей для регионов, областей, районов, школ, отдельных преподавателей и других участников образовательной деятельности. Сравнения проводятся либо по вертикали (территории, регионы, образовательные учреждения), либо по горизонтали (рейтинг школьников, рейтинг территорий и т.д.) на основе анализа количественных оценок по одинаковым показателям и с учетом различных факторов, смещающих оценки. По результатам сравнительного мониторинга обычно принимаются административные решения.

При проведении сравнений особое значение имеет анализ связей между показателями и их взаимного влияния. Необходимы доказательства достаточной полноты совокупности показателей, используемой в сравнительном мониторинге, и репрезентативности выборочных совокупностей учащихся, принимающих участие в проведении мониторинга. Специфика анализа данных в сравнительном мониторинге и особая ответственность за его результаты вынуждают предъявлять повышенные требования к качеству инструментария, его надежности и валидности.

В сравнительном мониторинге обычно используют количественные шкалы, стандартизированные тесты учебных достижений и профессионально разработанные анкеты для сбора дополнительной информации о факторах, находящихся вне деятельности школ, но существенно влияющих на результаты их образовательной деятельности.

Проведение сравнительного мониторинга нередко включает измерения входных данных и итоговых результатов обучения, поскольку многие из них значимо влияют на итоговые учебные достижения учащихся. Хотя возможности мониторинга этого вида у многих учителей вызывают сомнения и часто являются

предметом критики, мировой опыт свидетельствует о том, что сравнительный мониторинг приводит к явным позитивным следствиям. Межшкольные, межрайонные или межрегиональные сравнения стимулируют соревнование и мотивируют педагогов к улучшению образовательного процесса.

В сравнительном мониторинге обычно используют нормативно-ориентированные тесты учебных достижений, стандартизированные на представительных выборках в масштабах всей страны или региона. Таким образом, средние оценки по школам или районам могут быть сопоставлены с региональными и национальными нормами. Наибольшие трудности при проведении сравнительного мониторинга связаны со сбором дополнительной информации по ряду показателей, находящихся вне сферы влияния школ, но требующих учета при проведении межшкольных, межрайонных и других сравнений. Выбор этих показателей должен учитывать социальные и экономические особенности региона или района, организационные механизмы формирования состава школ и другие факторы, влияющие на качество образования.

**Прогностический мониторинг.** Прогностический мониторинг предназначен для выявления и предсказания позитивных и негативных тенденций в развитии образовательных систем. Он очень важен для решения управленческих задач в образовании, связанных с формированием социального заказа и соответствующих потенциалу системы образования. Роль прогностического мониторинга в условиях реформирования российского образования неуклонно возрастает в силу изменений, происходящих в характере управленческих решений на разных уровнях иерархии. Если раньше приоритет принадлежал оперативным управленческим решениям, направленным на текущее функционирование образовательных структур, то сейчас на первый план нередко выходят стратегические решения, нацеленные на развитие системы образования.

**Модели проведения мониторинга.**

**Модель соответствия нормам и стандартам.** Наиболее простая модель мониторинга нацелена на сбор данных о процессе и результатах образовательной деятельности, включая их анализ путем сопоставления с установленными нормами и стандартами. Достоинство модели соответствия нормам и стандартам - в простоте и оперативности реализации. Недостатки модели - ограниченные возможности интерпретации результатов мониторинга, связанные с отсутствием достаточного числа характеристик образовательной деятельности школ, процессов ее протекания и входных данных об учащихся. В силу отсутствия важной информации модель соответствия нормам и стандартам не позволяет корректно сопоставить результаты обучения и сделать обоснованные выводы для управления качеством образования.

**Модель «вход-выход» (на примере образования).** Классическая модель «вход-выход», используемая в большинстве стран в системах информационного и сравнительного мониторинга, основана на предположении о том, что входные данные учащихся существенно влияют на результаты их обучения в школе. К входным данным относят совокупность показателей, характеризующую начальные способности учащегося, социально-экономический статус семей учащихся, ресурсы школы (профессиональный уровень преподавателей школ, размеры финансирования на одного учащегося и т.д.). Выходные данные включают экзаменационные оценки учебных достижений учащихся и выпускников школ и полный перечень освоенных ими знаний и умений.

Учет входных данных позволяет выделить однородные группы школ, начинающих работу в одинаковых условиях, что гарантирует корректность внутригрупповых сравнений по конечным результатам образовательной деятельности. Сравнение школ с различными входными данными проводится с помощью уравнений множественной регрессии. Таким образом, модель «вход-выход» расширяет возможности мониторинга и позволяет проводить внутригрупповые и межгрупповые сравнения образовательных учреждений.

**Модель «вход-процесс - выход».** В настоящее время большое распространение получила так называемая модель с пятью факторами (модель «вход - процесс - выход»). Она включает в себя комбинацию характеристик не только результатов, но и процесса обучения. К факторам этой модели относятся:

- 1) сильное административное руководство;
- 2) наличие стабильного и хорошо организованного внутреннего микроклимата в классе и в школе;
- 3) преимущественная ориентация в обучении на формирование у учащихся базовых академических навыков;
- 4) повышенные требования к учащимся со стороны преподавателей, ориентирующие учащихся на постоянный прирост учебных достижений;
- 5) наличие системы внутришкольного мониторинга, обеспечивающей достоверную информацию о качестве образования.

Таким образом, улучшенная модель системы мониторинга образовательной деятельности - модель «вход-процесс - выход» - включает информацию относительно процессов, протекающих в школе при обучении и воспитании учащихся. В основе расширенной модели лежит предположение о том, что совершенствование процесса обучения запланированным образом неизбежно должно привести к более высоким учебным достижениям, что вполне отвечает реалиям в практике образования.

**Динамическая модель мониторинга.** Большинство сравнительных оценок деятельности школ основывается на межгрупповом анализе и сопоставлении средних оценок учебных достижений, существенно зависящих от контингента учащихся школы и социально-экономической характеристики района, в котором расположена школа. В силу социальной неоднородности заселения различных районов некоторые школы из года в год получают значительную долю неблагополучного контингента учащихся. Поэтому достижения таких школ при сравнении по конечным результатам обучения могут оставаться незамеченными годами, несмотря на эффективную образовательную деятельность и усилия педагогического

коллектива. Преодолеть этот недостаток можно, используя динамическую модель мониторинга, основанную на анализе динамики изменений в образовательной деятельности школы, выявлении их позитивного или негативного характера и степени влияния школы на происходящие изменения.

Наиболее эффективная динамическая модель мониторинга строится на измерениях скорости прироста учебных достижений учащихся в течение некоторого временного периода. Поскольку на темп развития учащихся существенно влияют начальные способности и характеристики семьи, то учет этих показателей обеспечивается без дополнительных усилий при измерениях скорости прироста учебных достижений. В этой связи многие специалисты настоятельно советуют использовать динамическую модель мониторинга, основанную на измерениях изменений в учебных достижениях.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Изучить теоретический материал.
2. Осуществить мониторинг изменения пульса при использовании кистевого эспандера: измерить начальный пульс  $P_0$ , в течении 40 минут проделать следующие упражнения: 10 жимов эспандера – измерение пульса – 3 минуты отдыха – 20 жимов эспандера – измерение пульса – 4 минуты отдыха – 30 жимов эспандера – измерение пульса – 5 минут отдыха – 30 жимов эспандера – измерение пульса – 10 минут отдыха – 40 жимов эспандера – измерение пульса.
3. Синтезировать регрессионные модели: «пульс»= $F$ («количества жимов»), «Количество жимов»= $FF$ («пульс») – обратная модель
4. По полученным моделям построить график, по которому получить уравнения динамики, передаточные функции и исследовать их на устойчивость (средствами MathLab).
5. Повторить п.3 и п.4 для объединенных данных групп студентов.
6. Сделать выводы
7. Оформить отчет, включающий результаты выполнения п.1 -5, краткие ответы на контрольные вопросы.

**Контрольные вопросы.**

1. Что такое мониторинг объекту управления?
2. Как осуществляется разведочный анализ результатов мониторинга?
3. Каким образом оценивается адекватность модели?
4. Что такое кибернетическая модель «вход-выход»?
5. Каким образом синтезируются статические модели?
6. Каким образом моделируются динамические модели?
7. Что такое параметрическое моделирование?
8. Что такое непараметрическое моделирование?
9. Какие инструменты компьютеринга используют при разведочном моделировании?
10. В чем заключаются особенности структурно-параметрической идентификации «вход-выход»?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 7. ИНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА И СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ**

**Цель работы:** овладение теоретическими и практическими навыками инженерно-психологического проектирования диалога ЭВМ, как средства отображения информационной модели окружающего мира в БТС и человека, как средства органического анализа информации, ее ввода в ЭВМ и принятия управленческого решения.

### **Краткие теоретические сведения**

В автоматизированных системах управления (анализа, идентификации, прогнозирования, принятия, исполнения и контроля решений) человек осуществляет опосредственную деятельность. Система отображения информации представляет для него своеобразное "окно" в реальность, т.к. отображает реальные объекты управления в виде информационной модели с семантической нагрузкой. Инженерно-психологическое проектирование интерфейса взаимодействия включает в себя обширный круг задач, которые должен решать разработчик данного биотехнического комплекса, т.к. использование ЭВМ в управлении существенным образом меняет как содержание, так и формы деятельности оператора. Эти задачи можно условно разделить на две группы:

- анализ процессов управления, определение функций и критериев оценки работы оператора, разделение функций биологической и технической частей, выявление функциональных и информационных связей между операторами и ступенями иерархической системы управления, подробного описания функций оператора, составление требований к скорости и точности действий с учетом динамических и эксплуатационных свойств управляемого объекта, разработка общей структуры СОИ, выбора принципов действия интерфейса взаимодействия;
- выбор наиболее представительной для эффективной работы оператора информации, составление алгоритмов переработки



информации, распределение сигналов по их важности, частоте и порядку предъявления, разработка информационной модели, выбор алфавита знаков и способа кодирования информации, выбор средств управления информационной моделью и других устройств ввода-вывода информации.

Особая группа задач связана с инженерно-психологическим проектированием интерфейса взаимодействия. Сюда входит выполнение в первую очередь таких работ как:

- разделение функций между био и техно частями,
- проектирование информационной модели взаимодействия,
- проектирование пультов управления информационными потоками,
- проектирование форм диалогового взаимодействия,
- согласование информационных моделей с психофизиологическими свойствами человека (его индивидуальной нормой),
- согласование рабочего поля воздействия с физическими и антропологическими свойствами и параметрами человека,
- определение оптимальных темпов и объемов информации,
- внесение конструктивных изменений в техническую часть БТС,
- разработка средств психологического обеспечения работы человека в режиме реального времени.

При решении практических задач инженерно-психологического проектирования наибольшее значение имеют следующие принципы:

1. Соответствие информационной модели доминирующему оперативному образу.
2. Учет оперативных порогов восприятия сигналов, т.е. интенсивности различительных признаков должны быть такими, чтобы достигались максимальная скорость и точность опознания сигнала,
3. Интеграция взаимосвязанной информации в целостно воспринимаемый образ.
4. Уменьшение нагрузки на память человека-оператора.
5. Минимизация психофизиологической цены деятельности человека-оператора.

1. Социальная значимость, цель, содержание деятельности и эстетические свойства техники должны удовлетворять психо-социальным потребностям человека.

В подавляющем большинстве случаев для человека-оператора характерен так называемый линейный алгоритм решения задачи управления, который представляет собой последовательный набор операторов, выполняемых друг за другом. Таким образом, время выполнения оператором функций управления можно определить по формуле:

$$T_{оп} = T_{зп} + T_{пи} + T_{оу} + T_{м} , \quad (1)$$

где  $T_{ви}$  - время зрительного поиска и средств отображения,

$T_{пи}$  - время приема информации и принятия решения,

$T_{оу}$  - время обнаружения органа управления,

$T_{м}$  - время моторного акта, связанного непосредственно с движением органа управления.

Сравнительный анализ возможностей человека и ЭВМ представлены в Таблице 1.

В случае выполнения действий, связанных с прерыванием предыдущей операции, время выполнения прерванного действия увеличивается за счет увеличения времени выполнения последующих действий и времени восстановления в памяти результатов уже проведенных работ.

Время поиска можно считать функцией деятельности одной фиксации и числовых характеристик поля:

$$T = F(N, M, T_{ф}, G), \quad (2)$$

где  $T$  - среднее время поиска,  $N$  - общее число элементов информационного поля,  $M$  - число искомых элементов,  $T_{ф}$  - время фиксации,  $G$  - объем фиксации (оперативное поле).

**Таблица 1 Сравнительный анализ возможностей человека и ЭВМ**

Показатель	Человек	ЭВМ	Совместное выполнение управленческих функций
Способность работать в неожиданных ситуациях	Высокие гибкость и приспособляемость	Невозможно запрограммировать все случайности	Человек, комбинируя программы и методы, может направлять работу системы
Обработка недостаточно достоверной и полной информацией	Способность воссоздать целостное событие	Практически невозможно	Человек корректирует решение ЭВМ
Выбор способа действия	Возможность выбора велика	Выбор ограничен	Человек выбирает действия ЭВМ и реализует их
Выбор наилучшего решения в многовариантной задаче	Возможность выбора мала	Высокая	Человек направляет поиск
Надежность	Низкая	Средняя	На порядок выше, чем у компонентов системы
Работоспособность	Зависит от утомляемости	Постоянная	ЭВМ предоставляет страховочную помощь
Превышение возможностей	Возможна перестройка деятельности и стресс	Задержка в решении, срыв управления	Зависит от человека и объема и топологии информационной сети БТС

Большое влияние на результаты поискового действия оказывает дисциплина поиска. Так, при неупорядоченном движении взгляда время поиска определяется как отношение времени фиксации к априорной вероятности успеха на первом шаге поиска, которая приблизительно равна отношению  $M$  к  $N$ . Однако в реальных условиях поиск носит сознательный характер и тогда имеет место соотношение:

$$T = (N/G + 1) * T_f / (M + 1) \quad (3)$$

Размер оперативного поля зрения  $G$  выбирают исходя из условий работы с заданным информационным полем. Для

однородных цифровых групп  $G=\text{LOG}(L)$ , где  $L$  - число элементов в группе.

Аналогично определяют время поиска и при работе с информационными полями, элементами которых являются группы символов, характеризующие параметры объекта:

$$T = (N_{\phi} + 1) * T_{\phi} / (M + 1), \quad (4)$$

где  $N_{\phi}$  - количество групп.

Если дополнительно требуется сканирование признаков внутри группы (формуляра), то :

$$T = N_{\phi} * L * T_{\phi} / (G * (M + 1)), \quad (5)$$

где  $L$  - размер группы.

Сложность логической обработки информации характеризуется коэффициентом логической сложности, который определяется как сумма произведений частот повторений групп на количество логических условий в каждой из них.

Скорость выполнения человеком операций в процессе выработки стратегия управления характеризуется коэффициентом интенсивности рабочего процесса, определяемого как отношение количества операций и логических условий алгоритма ко времени реализации последнего.

Точность функционирования интерфейса взаимодействия оператора с техническими средствами можно определить по следующей формуле для систематических погрешностей:

$$N = N_p + N_i, \quad (6)$$

где  $N_p$  - приборная ошибка информационной модели,

$N_i$  - ошибка интерполяционного совмещения, допускаемая человеком при съеме показаний со шкал.

Зависимость между длиной алфавита предъявляемых сигналов и объемом кратковременной памяти оператора выражается уравнением:

$$N_a^w = N_b^n, \quad (7)$$

где  $N_a$  - алфавит предъявляемых сигналов,

$w$  - объем кратковременной памяти,

$N_b$  - физиологическая константа, колеблющаяся в диапазоне  $(9^9 - 10^{8.6})$ . Например, для обработки цифр, алфавит которых равен 10, предельный объем  $w$  равен 8.6. В условиях

задачи зрительной интерполяции можно допустить, что алфавит сигналов соответствует числу различных позиций указателя на интервале.

Из экспериментальных исследований известно, что дифференциальный порог различимости равен примерно 0.01 от длины интервала, т.е. алфавит составляет 100 различных градаций. Следовательно, объем кратковременной памяти при идентификации позиций указателя на интервале, которое можно удержать в кратковременной памяти равен  $w = 4.3$ . Полученное значение выражает максимальное число позиций указателя на интервале, которое может удержать в кратковременной памяти оператор и точно идентифицировать в момент выполнения задачи зрительной интерпретации.

Ошибки действий, превышающие допустимые пределы, влекут за собой отказ. Ошибки действий человека обусловлены различными факторами:

- эргономическими характеристиками СОИ,
- количеством и скоростью предъявления информации,
- нейрофизическими особенностями и состоянием оператора.

Причиной появления ошибок являются такие факторы как:

- отсутствие идентичности шкал, систем отсчета или масштабов изображения,
- детренированности и/или утомления оператора,
- несоответствие пропускной способности оператора скорости поступления информации,
- ограниченность сенсорных способностей оператора,
- неопытность оператора.

В современных СОИ широкое распространение получили следующие способы кодирования: символами, ориентацией, расположением, типом, шириной и длиной линии, площадями, яркостью, цветом.

Общая длина алфавита  $R$ , необходимая для кодирования данных на экране СОИ, может быть оценена с помощью соотношения:

$$R = \sum_i^m \sum_j^n \sum_k^z r_{ijk} \quad , \quad (8)$$

где  $r_{ijk}$  - длина алфавита, необходимого для кодирования  $k$ -ой характеристики  $j$ -го объекта,  $z$  - количество характеристик  $j$ -го объекта,  $n$  - число объектов  $i$ -го типа,  $m$  - количество группы объектов, включающее в себя динамическую, статическую и служебную информацию.

Правильная идентификация объектов оператором обеспечивается при выполнении условия превышения количества градаций используемой совокупности способов кодирования над общей длиной алфавита.

Известно, что удлинение алфавита приводит к увеличению времени задержки между моментами предъявления сигналов и восприятия информации оператором. В общем случае это время определяется суммой времени латентного периода (время от момента предъявления сигнала и началом реакции на него) и времени опознания предъявляемого сигнала. Продолжительность последнего зависит от длины алфавита следующим образом:

$$T_2 = Y * \text{LOG}_2(R)/C, \quad (9)$$

где  $Y$  - количество символов алфавита, которые требуется опознать,

$C$  - пропускная способность человека-оператора.

При выборе алфавит символов групп возникает необходимость учета ошибок восприятия информации оператором. Наиболее характерными ошибками, встречающимися при восприятии букв, являются:

- ошибки по общему сходству начертания букв (А-Д-Л, Э-З, Ш-Щ, Е-С-О и тому подобное),
- Ошибки по общему сходству отдельных частей букв (Б-В-Ь-Ы, З-В, И-У и тому подобное),
- ошибки зрительно-пространственного характера, ведущие к неправильному опознанию букв (И-П-Ц-К, П-Ц-Н-И и тому подобное). Таким образом, если в составе алфавита знаков и символов предполагается иметь ограниченное число букв, то выбор их должен производиться с учетом минимизации вероятности появления ошибок всех видов, чтобы исключить возможность их неправильного восприятия.

Из эргономических характеристик процесса информационного обмена кроме светозвуковых (рассматриваются при изучении курса "Безопасность жизнедеятельности") существуют и такие как: количества строк и столбцов в поле операторской деятельности и информационная емкость экрана. Зная размеры экрана и величину знакоместа одного символа, определяют количество возможных текстовых строк  $M$  и столбцов  $N$  :

$$M = A / (2 * h) \quad N = (0.6 - 0.75) * B / b \quad (10)$$

Зная количество строк и столбцов в информационном поле, можно определить информационную емкость экрана

$$N_{\text{э}} = M * N \quad (11)$$

Учитывая способ формирования символа с помощью точечных элементов отображения в виде знакосинтезирующей матрицы, имеем:

$$N_{\text{э}} = M * N * k_0, \quad (12)$$

где  $k_0$  - количество точечных элементов в знакосинтезирующей матрице.

Тогда информационная емкость может быть выражена в битах:

$$N_{\text{э}} = M * N * \text{LOG}_2(N_0), \quad (13)$$

где  $N_0$  - основание кода полного алфавита.

Заметим, что информационная емкость экрана значительно увеличивается при введении цвета - за счет, по сути, увеличения основания кода алфавита признаков.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить теоретические сведения.
2. Решить следующую задачу по оценке интерфейса "человек - СОИ".

(Все выделенные в тексте задачи переменные выбрать из Таблице 2 согласно номеру варианта, который равен порядковому номеру студента в группе.)

При разработке дружественного интерфейса оператора-диагностика текущего состояния пациента в отделении интенсивной терапии со средствами отображения информации, в качестве которого использован монитор (рабочее поле оператора) с размерами  $A$  и  $B$  мм и размерами элемента изображения  $b$  и  $h$

мм и использованием стандартной клавиатуры в качестве органа ввода информации и управления текущей ситуацией терапевтического воздействия были экспериментально зафиксированы и рассчитаны следующие показатели и условия работы:

1.  $t_{п}$  - время зрительного поиска,  $t_{и}$  - время приема информации,  $t_{ор}$  - время обнаружения клавиши (органа управления),  $t_{м}$  - время моторного акта (секунды).
2. Оператор достаточно опытный и имеет среднее время фиксации элемента изображения  $f$ (сек.) с объемом фиксации  $G$  элементов. Причем, на экране СОИ находится  $M$  элементов подлежащих наблюдению на фоне  $N$  элементов информационного поля в целом.
3. Оператор в ходе принятия решения работает по алгоритму с  $i$  логическими условиями ( $i=1,2,3$ ) в  $i$ -ой группе с равновероятностным их появлением; при этом время реализации алгоритма  $t$ .
4. К середине рабочего дня ошибка интерполяционного совмещения графических объектов составляет  $N_i$ , при приборно-мониторной ошибки информационной модели  $N_p$ .
5. Алфавит предъявляемой информации имеет мощность  $R$ , причем, количество опознаваемых символов  $v$   $k$  раз меньше пропускной способности человека-оператора.

Требуется оценить такие показатели интерфейса как:

- время выполнения управляющих функций,
- время поиска элемента изображения,
- коэффициентов логической сложности и интенсивности рабочего процесса,
- точность функционирования интерфейса и время опознания предъявляемого сигнала,
- информационную емкость экрана, включая количество возможных текстовых строк и столбцов.

5. Оформить отчет о выполнении практической работы, в который должно входить: условие задачи, расчетные формулы, результаты расчета и выводы, конспективное изложение изученного материала.



## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ГРАФОВ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ**

**Цель работы:** представить и проанализировать графы управляющих автоматов.

### **Краткие теоретические сведения**

Любое цифровое устройство можно рассматривать как устройство, состоящее из двух частей: операционного и управляющего блоков. Операционный блок, например АЛУ, характеризуется совокупностью определённых в нём микроопераций, каждая из которых представляет собой некоторый выполняемый в данном операционном блоке акт передачи или преобразования информации. Часть цифрового вычислительного устройства, предназначенного для выработки последовательности управляющих функциональных сигналов, называется управляющим блоком или управляющим устройством (УУ).

Формально УУ можно рассматривать как конечный автомат, определяемый:

- 1) множеством двоичных выходных сигналов,
- 2) множеством входных сигналов,
- 3) множеством подлежащих реализации программ,
- 4) множеством внутренних состояний.

Управляющие блоки называются управляющими автоматами. Поскольку эти автоматы задаются микропрограммами, они часто именуется микропрограммными автоматами.

Существуют два метода построения логики управляющих автоматов:

- с жёсткой логикой,
- с хранимой в памяти логикой.

Управляющие автоматы с "жёсткой" логикой представляют собой логические схемы, вырабатывающие распределённые во времени управляющие функциональные сигналы. В отличие от управляющих устройств, с хранимой в памяти логикой, у этих

автоматов можно изменить логику работы только путём переделок схем автомата.

ЭВМ высокой производительности управляются автоматами с "жёсткой" логикой. Типичным применением такого автомата является устройство управления АЛУ.

Процесс синтеза цифрового автомата, заданного микропрограммой (МП) включает следующие этапы:

- Кодированное представление графа микропрограммы или получение граф-схемы алгоритма (ГСА) работы УА (рис. 2.1).
- Разметка ГСА для определения состояний УА, функционирующего в соответствии с моделью автомата Мили (Мура).
- Построение графа автомата Мили (Мура).
- Составление структурной таблицы автомата и кодирование его состояний.
- Построение структурной схемы автомата.
- Построение комбинационной части автомата.

По микропрограмме строится соответствующий управляющий автомат Мили или Мура.

#### **Построение автомата Мили**

Разметка ГСА для определения состояний УА, функционирующего в соответствии с моделью автомата Мили

Набор состояний определяется путем отметки МП:  
для автомата Мили:

- символом  $Q_0$  отмечается вход первой вершины, следующей за начальной, а также вход конечной вершины;
- входы вершин, следующих за операторными, отмечаются символами  $Q_i$ ;
- входы двух различных вершин, за исключением конечной, не могут быть отмечены одинаковыми символами;
- вход вершины может отмечаться только одним символом.

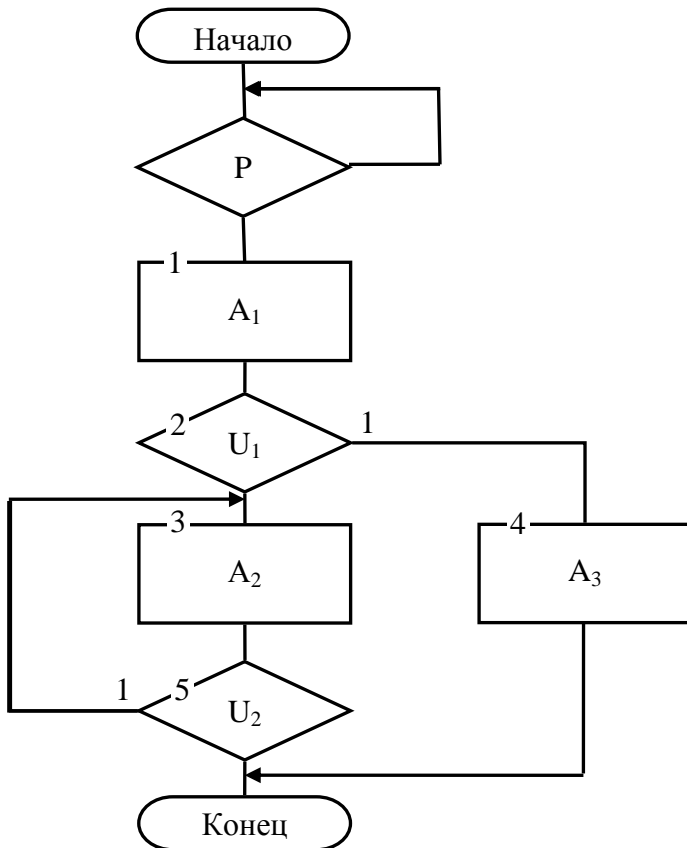


Рис. 1 Микропрограмма автомата

### Построение графа автомата Мили

Если состояниям  $Q_0, Q_1, Q_2$  поставить в соответствие вершины графа, а путям – дуги, направленные из вершины  $Q_i$  в  $Q_j$  и помеченные наборами значений «входные переменные» / «выходные переменные», то полученный граф будет определять закон функционирования автомата Мили:

$$Q(t+1) = \delta [Q(t), U(t)]$$

$$A(t) = \lambda [Q(t), U(t)],$$

где  $Q = \{ Q_0, Q_1, Q_2 \}$ ,

$$A = \{ A_1, A_2, A_3 \},$$

$$U = \{ U_1, U_2 \},$$

$$t = 0, 1, \dots$$

Дуги на графе автомата отмечаются только теми входными сигналами, которые определяют возможность перехода из состояния  $Q_i$  в  $Q_j$ , и теми выходными сигналами, которые в данной ситуации принимают значение 1. При этом

предполагается, что все остальные выходные сигналы имеют нулевое значение.

Когда автомат не работает (микропрограмма не выполняется), он находится в состоянии  $Q_0$ . При запуске (инициировании микропрограммы) автомат сохраняет состояние  $Q_0$  в течение одного такта, за время которого выполняются микрооперации, соответствующие текущим значениям входных сигналов. По окончании первого такта автомат переключается в очередное состояние  $Q_i$ , предписанное законом функционирования.

Для запуска автомата используется специальный сигнал  $P$ , который относится к группе входных сигналов и имеет длительность, равную такту. Чтобы исключить возможность появления выходных сигналов в моменты, когда автомат находится в состоянии  $Q_0$  и не работает, дугам, исходящим из вершины  $Q_0$  дополнительно приписывается запускающий сигнал  $P$ , только при единичном значении которого выходным сигналам присваивается 1 и становится возможным переход автомата в следующее состояние. При  $P=0$  автомат находится в  $Q_0$  и все выходные сигналы равны 0.

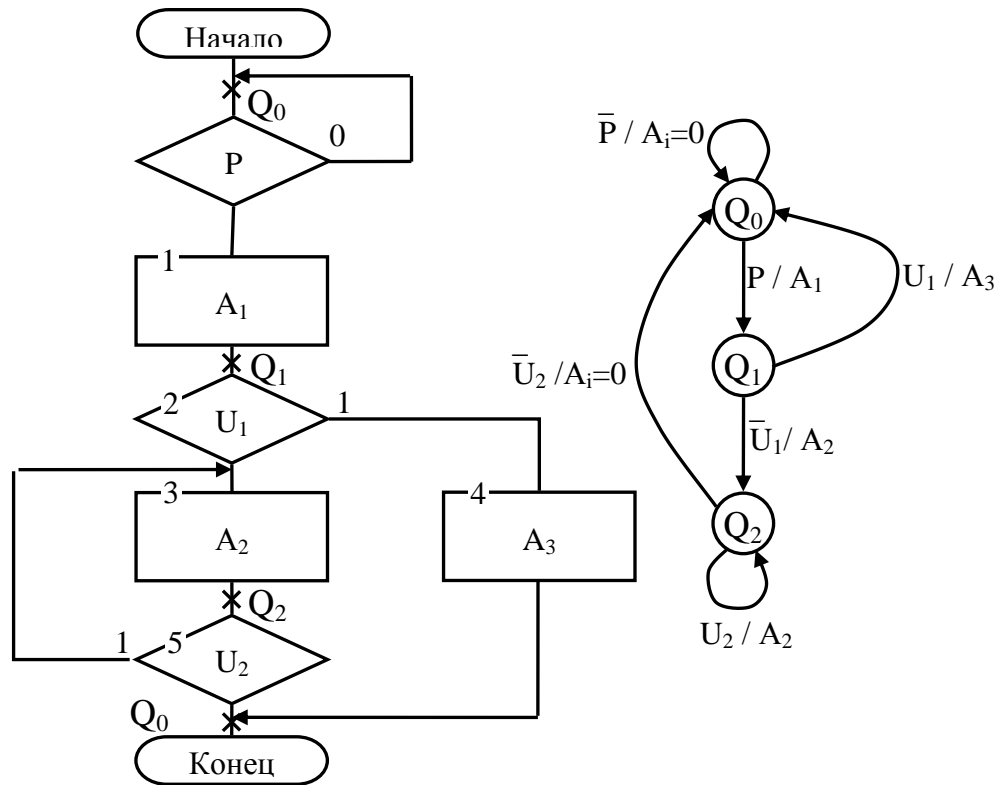


Рис. 2 Микропрограмма и граф интерпретирующего её автомата Мили

Переход от микропрограммы к автомату Мили иллюстрируется рис. 2, на котором показаны микропрограмма с метками ( $\times$ ) и граф интерпретирующего её автомата Мили.

Условия перехода по микропрограмме от одной метки состояния к другой задают функции переходов. Эти условия записываются в виде конъюнкции входных сигналов ( $P$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ). Для каждого перехода фиксируется также набор выходных переменных ( $U_1$ ,  $U_2$ ), принимающих при переходе единичное значение (задание функции выходов).

От графа, интерпретирующего микропрограмму, можно перейти к её технической реализации.

Прежде всего, запишем закон функционирования автомата в виде таблицы переходов.

**Составление структурной таблицы автомата и кодирование его состояний**

Таблица 1. Переходы автомата Мили

Исходное состояние	Входной набор	Выходной набор	Следующее состояние
Q <sub>0</sub>	$\bar{P}$	-	Q <sub>0</sub>
Q <sub>0</sub>	P	A <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>
Q <sub>1</sub>	U <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	Q <sub>0</sub>
Q <sub>1</sub> ,	$\bar{U}_1$	A <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>
Q <sub>2</sub>	U <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>
Q <sub>2</sub>	$\bar{U}_2$	-	Q <sub>0</sub>

Зная число состояний автомата  $m$ , определим число триггеров, необходимых для реализации его памяти,  $K = \log_2 m$ .

Для приведённого примера  $m=3 \Rightarrow K = \log_2 3 \cong 2$  требуется два триггера.

Закодируем состояния автомата следующим образом:

$$Q_0 = 00; Q_1 = 01; Q_2 = 10.$$

Для построения функций возбуждения и выходов используется структурная таблица, в которую добавлены два столбца кодов и столбец с перечнем сигналов возбуждения триггеров, формируемых на переходе.

Таблица 2. Переходы автомата Мили с кодами состояний

Исх. сост.	Код исх. сост.	Вх. набор	Вых. набор	След. сост.	Код след. сост.	Сигналы возбуждения	
						RS	
Q <sub>0</sub>	00	$\bar{P}$	-	Q <sub>1</sub>	00	-	
Q <sub>0</sub>	00	P	A <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	01	S <sub>2</sub>	
Q <sub>1</sub>	01	U <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	Q <sub>0</sub>	00	R <sub>2</sub>	
Q <sub>1</sub> ,	01	$\bar{U}_1$	A <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	10	S <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	
Q <sub>2</sub>	10	U <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	10	-	
Q <sub>2</sub>	10	$\bar{U}_2$	-	Q <sub>0</sub>	00	R <sub>1</sub>	

Функции возбуждения выходов:

$$A_1 = Q_0 P$$

$$A_2 = Q_1 \bar{U}_1 \vee Q_2 U_2$$

$$A_3 = Q_1 U_1$$

(1)

Подставляя в (1) выражения состояний через состояния  $p_1$  и  $p_2$  триггеров памяти

$$Q_0 = \bar{p}_1 \bar{p}_2$$

$$Q_1 = \bar{p}_1 \bar{p}_2$$

$$Q_2 = p_1 p_2$$

Имеем

$$A_1 = \bar{p}_1 \bar{p}_2 P$$

$$A_2 = \bar{p}_1 p_2 \bar{U}_1 \vee p_1 \bar{p}_2 U_2 \quad (2)$$

$$A_3 = \bar{p}_1 p_2 U_1$$

Функции возбуждения памяти зависят от типа триггера (RS, T, JK, D и др.)

Логика работы определяется количеством входов и особенностями схемы. В зависимости от влияния, оказываемого на состояние триггера, его входы имеют следующие обозначения:

- R (Reset — сброс) — вход (раздельной) установки триггера в нулевое состояние,  $Q = 0$
- S (Set — установка) — вход (раздельной) установки триггера в единичное состояние,  $Q = 1$
- T (Toggle — релаксатор) — счетный вход триггера
- J (Jerk — внезапное включение) — вход установки JK-триггера в единичное состояние,  $Q = 1$  (- вход для синхронизируемой установки в 1)
- K (Kill — внезапное выключение) —  $Q = 0$  (вход для синхронизируемой установки в 0);
- D (Delay — задержка) — вход установки триггера в единичное или нулевое состояние на время, равное одному такту
- C (Clock — часы) — вход синхронизирующих тактовых импульсов
- Y - вход разрешения.

Входы и выходы триггеров так же, как и других логических элементов, могут быть прямыми и инверсными, т.е. наличие сигнала определяется высоким или низким уровнем напряжений соответственно.

### RS-триггеры

Выберем для определённости RS-триггеры с раздельными входами.

Таблица 3. Состояния RS триггера

$R^t$	$S^t$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	Режим
0	0	0/1	0/1	Хранение
0	1	0/1	1	Уст. 1
1	0	0/1	0	Уст. 0
1	1	0/1	0*	Запрещ. режим

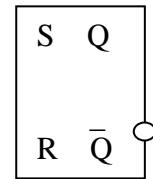


Рис. 2.4. УГО RS триггера

В столбце сигналов возбуждения указывается сигнал  $S_k$ , если триггер  $T_k$  на переходе  $(a_i, a_i)$  переключается из состояния 0 в состояние 1, и сигнал  $R_k$ , если триггер переключается из состояния 1 в состояние 0.

$$R_1 = Q_2 \quad \bar{U}_2 = \bar{p}_1 \quad \bar{p}_2 \quad \bar{U}_2$$

$$S_1 = Q_1 \quad \bar{U}_1 = \bar{p}_1 \quad p_2 \quad \bar{U}_1$$

$$R_2 = Q_1 \quad \bar{U}_1 \vee \bar{Q}_1 \quad \bar{U}_1 = Q_1 (\bar{U}_1 \vee U_1) = Q_1 = \bar{p}_1 \quad p_2$$

$$S_2 = Q_0 \quad P = \bar{p}_1 \quad \bar{p}_2 \quad P$$

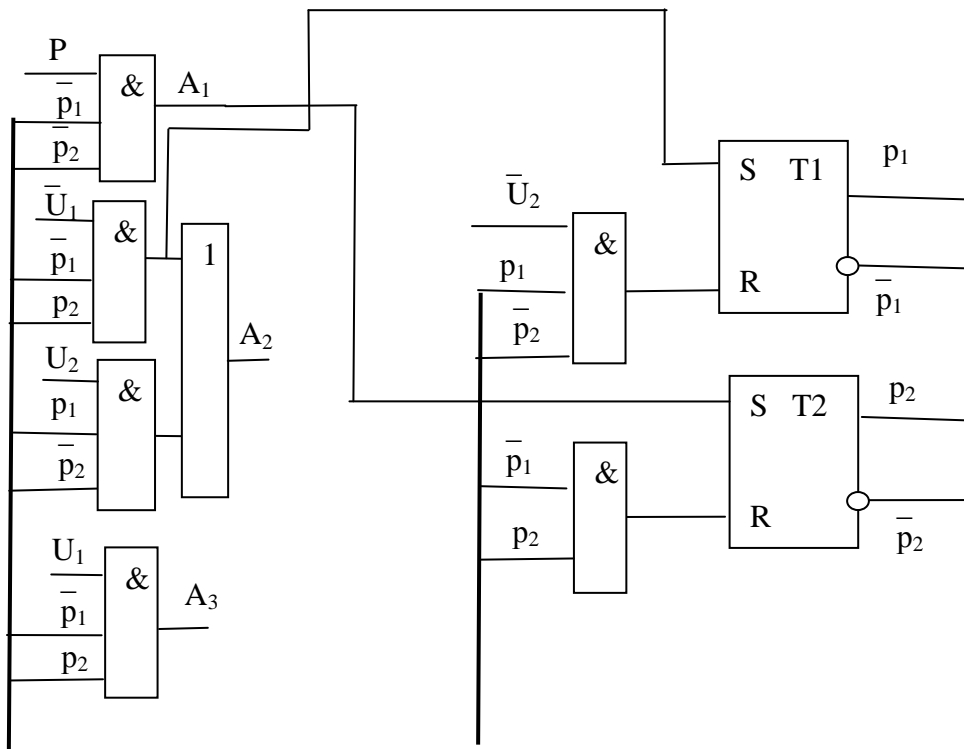




Рис. 5. Схема 1 на RS триггерах

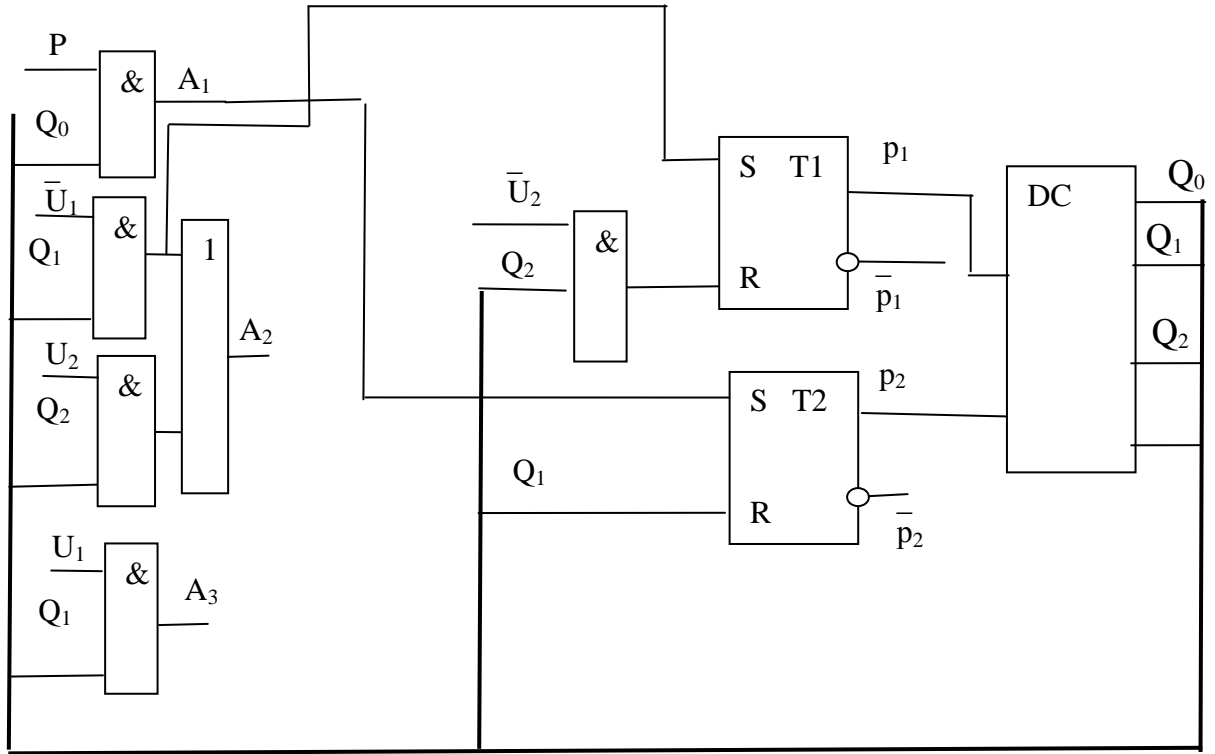


Рис.6. Схема 2 на RS триггерах

### D-триггеры

D-триггер предназначен для хранения состояния (1 или 0) на один период тактовых импульсов (с задержкой на 1 такт). Его переходы отражены в табл.

Таблица 2.4. Переходы D-триггера

Входные сигналы	Состояние $q_t$		Режим
	0	1	
D	0	1	
0	0	0	Установка 0
1	1	1	Установка 1

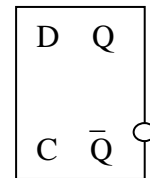


Рис. 2.7. УГО D-триггера

Сигнал  $D_i = 1$  возбуждения триггера в следующее состояние должен формироваться всякий раз, когда при переходе следующее состояние равно 1

Таблица 2.5. Переходы автомата Мили с кодами состояний

Исх. сост.	Код исх. сост.	Вх. набор	Вых. набор	След. сост.	Код след. сост.	Сигналы возбуждения	
						RS	D
$Q_0$	00	$\bar{P}$	-	$Q_1$	00	-	-
$Q_0$	00	P	$A_1$	$Q_1$	01	$S_2$	$D_2$
$Q_1$	01	$U_1$	$A_3$	$Q_0$	00	$R_2$	-
$Q_1$ ,	01	$\bar{U}_1$	$A_2$	$Q_2$	10	$S_1 R_2$	$D_1$
$Q_2$	10	$U_2$	$A_2$	$Q_2$	10	-	$D_1$
$Q_2$	10	$\bar{U}_2$	-	$Q_0$	00	$R_1$	-

$$D_1 = Q_1 \bar{U}_1 \vee Q_2 U_2 = \bar{p}_1 p_2 \bar{U}_1 \vee p_1 \bar{p}_2 U_2$$

$$D_2 = Q_0 P = \bar{p}_1 \bar{p}_2 P$$

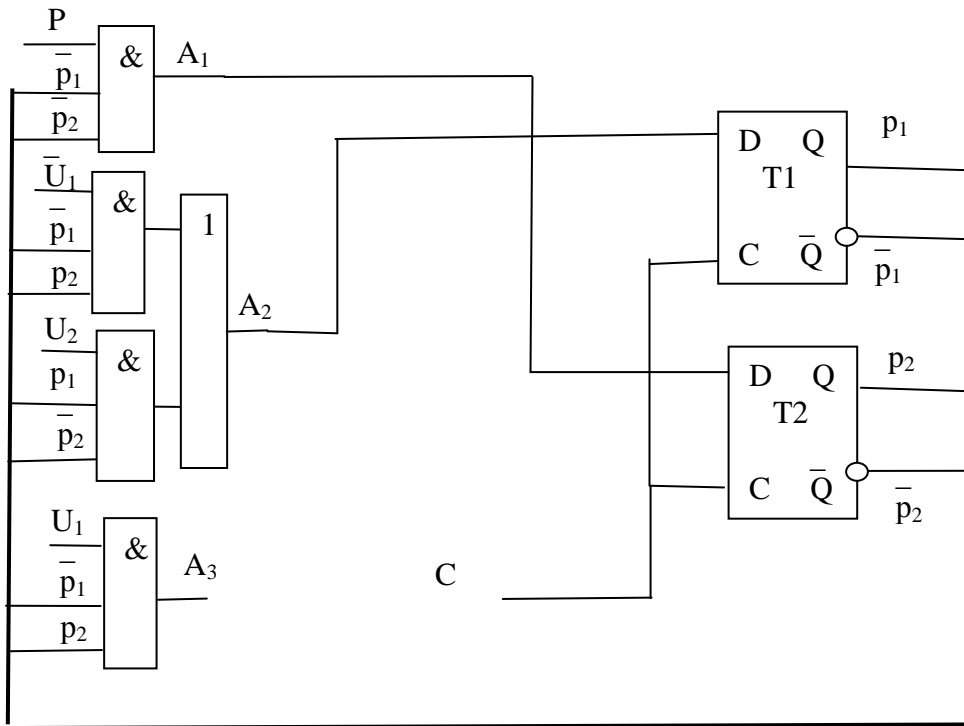


Рис. 6. Схема 1 на D триггерах

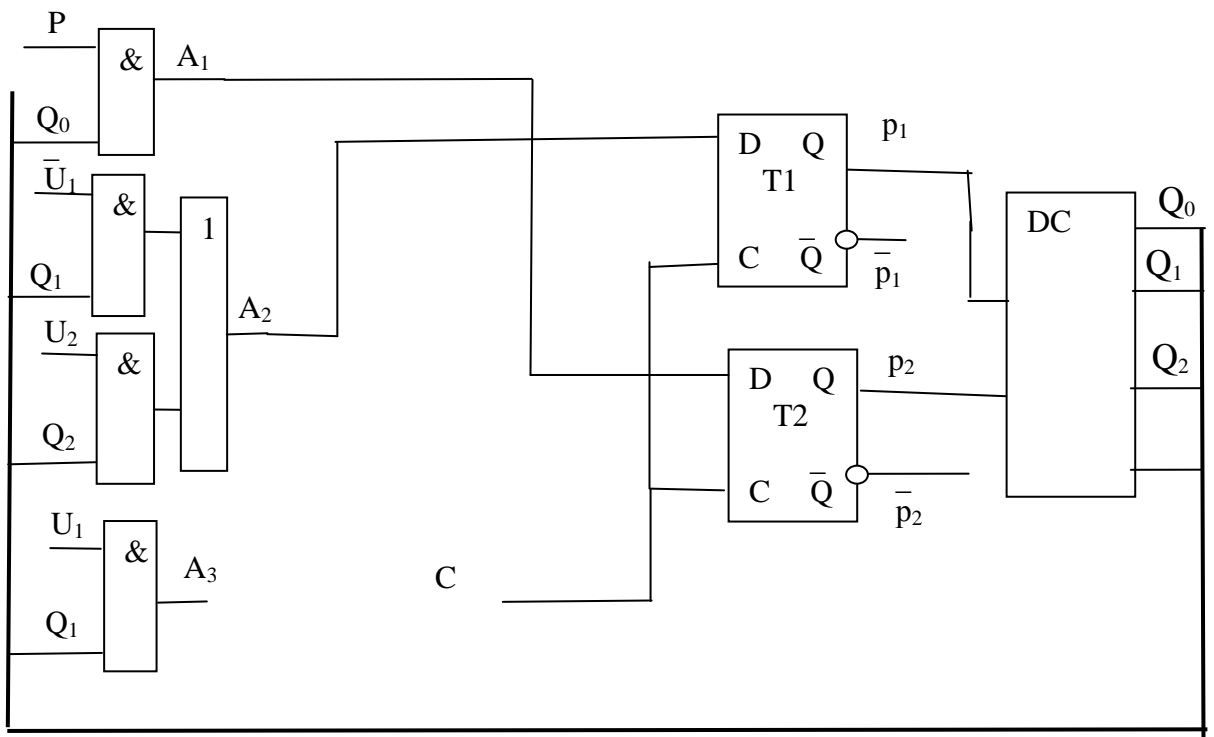


Рис. 7. Схема 2 на D триггерах

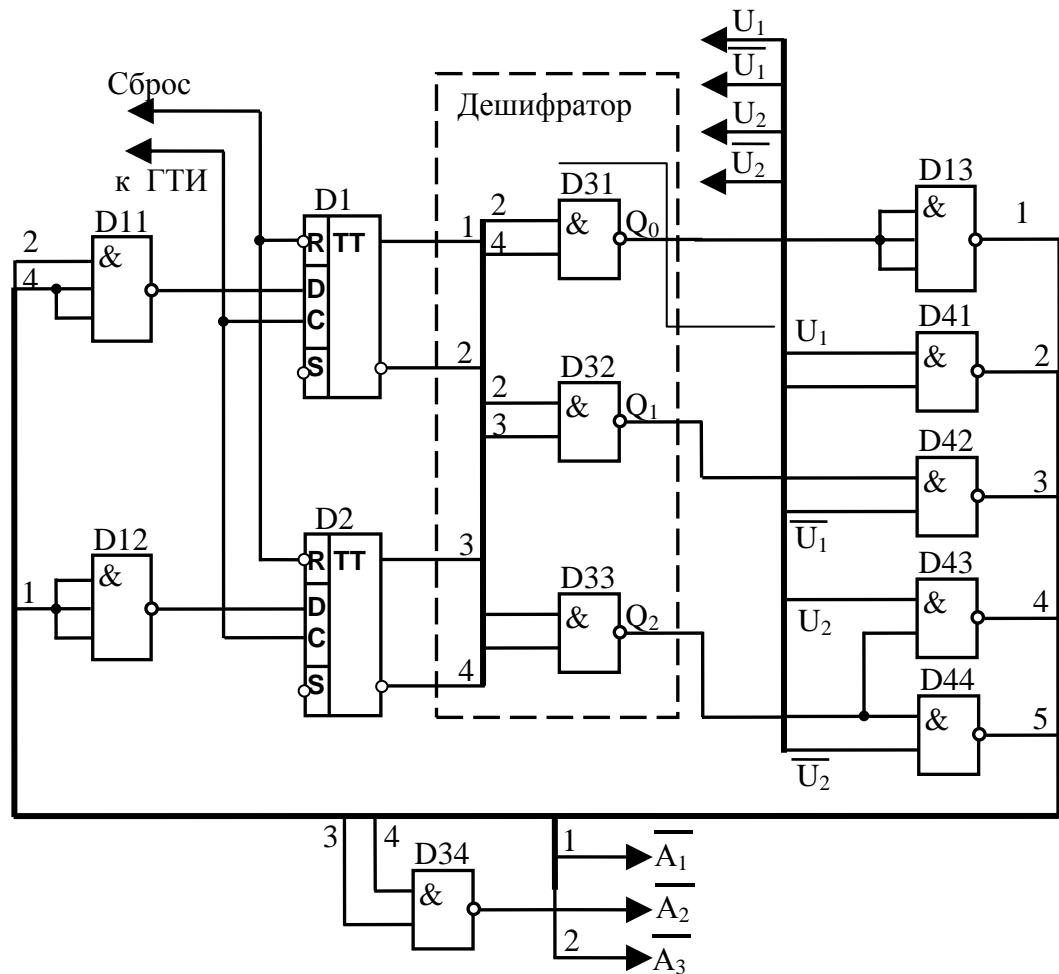


Рис. 8. Схема 3 на D триггерах

Схема дешифрации состояний состоит из элементов D3.1, D3.2, D3.3.

На элементах D1.3, D41- D44 собрана схема, вырабатывающая управляющие сигналы состояний  $Q_0$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$  и множество выходных сигналов  $\{A\}$ .

Схема функционирует так, что на её выходах только одно логическое значение "0", все остальные - "1". Зная этот выход (в разные моменты времени он разный) и граф микропрограммы, можно точно определить текущие и следующие состояния автомата, выходные управляющие сигналы. Поэтому тем, на какие элементы D1 или D2 заведён этот вывод (провод), и определяются следующие состояния автомата.

Объединение по схеме "монтажная логика" некоторых выводов этих элементов (D13, D4) согласно графу функционирования автомата даёт множество управляющих выходных сигналов.

Элементы D1.1, D1.2 служат для формирования функций возбуждения триггеров.

### Построение автомата Мура

**Разметка ГСА для определения состояний УА, функционирующего в соответствии с моделью автомата Мили**

Набор состояний определяется путем отметки МП: для автомата Мура:

- символом  $Q_0$  отмечается начальная и конечная вершины;
- символами  $Q_i$  отмечаются каждая операторная вершина;
- входы двух различных вершин, за исключением конечной, не могут быть отмечены одинаковыми символами;
- вход вершины может отмечаться только одним символом.

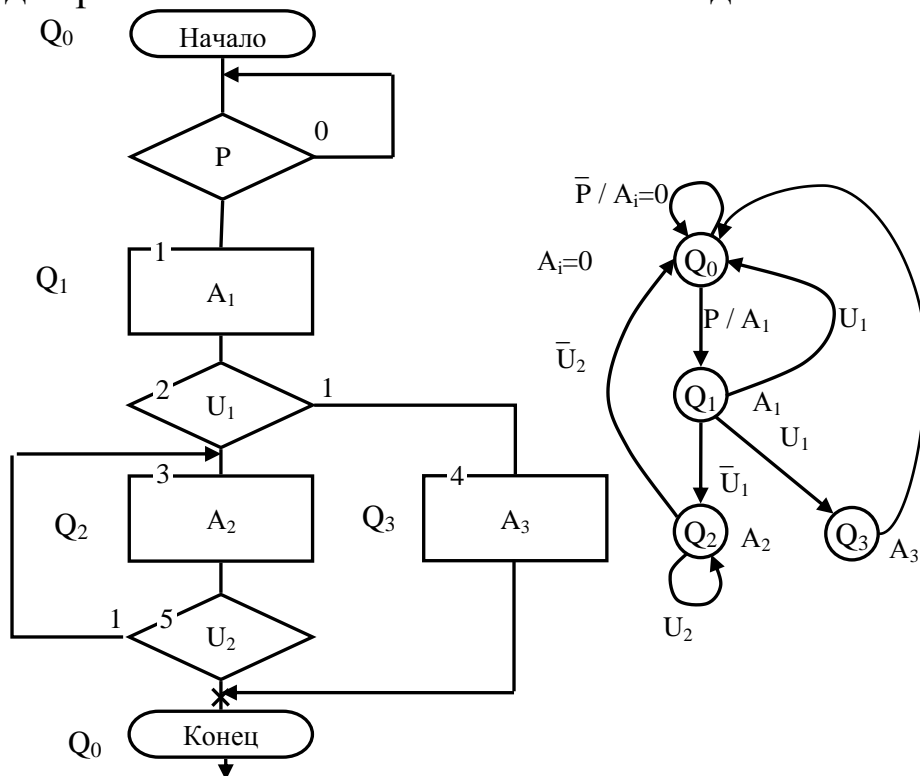


Рис. 9 Микропрограмма и граф интерпретирующего её автомата Мили

Переход от микропрограммы к автомату Мили иллюстрируется рис. 2.2, на котором показаны микропрограмма с метками (×) и граф интерпретирующего её автомата Мили. [2]

### Порядок выполнения работы

1. Получите у преподавателя вариант индивидуального задания.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Микропрограмма автомата (рис. 2.10-2.15)	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16	2.17	2.18	2.19

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Микропрограмма автомата (рис. 2.10-2.15)	2.20	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29

#### Задание А.

2. От микропрограммы перейдите к графу интерпретирующего автомата Мили.

3. По графу микропрограммы синтезируйте схему технической реализации.

4. Проверьте правильность функционирования автомата. Для этого:

- подайте кратковременно на вход R сигнал со значением логического "0". При этом произойдёт сброс их триггеров в "0",
- определите множество входных сигналов, определяющих переход автомата из одного состояния в другое.

5. Подготовьте отчет в виде файла в формате MS Word, содержащий вариант ГСА, автоматную модель, структурные таблицы, схему и результат ее моделирования в системе QuartusII (приложить соответствующие файлы)

#### Задание Б.

5. От микропрограммы перейдите к графу интерпретирующего автомата Мура.

6. По графу микропрограммы синтезируйте схему технической реализации.

7. Проверьте правильность функционирования автомата.

8. Подготовьте отчет в виде файла в формате MS Word, содержащий вариант ГСА, автоматную модель, структурные таблицы, схему и результат ее моделирования в системе QuartusII (приложить соответствующие файлы)

Контрольные вопросы.

1. Из каких частей состоит цифровое устройство?
  2. Опишите операционный блок.
  3. Опишите управляющий блок.
  4. Чем определяется конечный автомат?
  5. Назовите методы построения логики управляющих автоматов.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №9. СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель работы:** изучение способом синтеза управляющих автоматов на основе микропрограммного управления как основы функционирования систем управления в кибернетических системах в медицине.

### **Краткие теоретические сведения.**

Управляющие автоматы (УА) предназначены в общем случае для формирования управляющих сигналов систем управления различными объектами или процессами. Функционирование управляющего автомата определяется графом, состояния которого вырабатывают определенные сигналы для управления объектом и переключаются из одного в другое при выполнении определенных условий (в том числе – временных). УА обязательно имеют начальное и конечное состояния. Работа элементов УА должна быть синхронизирована. УА можно строить двумя основными способами.

*Управляющий автомат с жесткой логикой* – специальная логическая сеть с элементами памяти, реализующая микропрограмму выполнения команды. Структура сети определяется теми микропрограммами, которые должны выполняться данным устройством. При этом способе можно свести к минимуму объем оборудования и, что бывает гораздо важнее, обеспечить максимально возможное быстродействие. Зато проектирование такого управления является делом долгим и сложным, а перепрограммирование УА на другую работу вообще невозможно.

*Микропрограммный УА*, или управляющий автомат с программируемой логикой, строится с использованием специальной встроенной памяти микропрограмм. В эту память записываются все требуемые микропрограммы, а от схемы управления требуется только организация чтения микропрограмм. Проектирование микропрограммного автомата несравненно проще, так как в нем используются типовые аппаратные модули. Единственной специальной задачей,



решаемой в рамках теории автоматов, остается абстрактный синтез и составление таблиц программирования памяти. Недостатками микропрограммного управления является некоторая избыточность оборудования и меньшее быстродействие.

В действительности оба принципа построения УА сочетаются в той или иной пропорции, причем в наиболее производительных супер-ЭВМ используется схемная логика, а в малых - преобладает микропрограммное управление. В дальнейшем мы займемся вопросом построения микропрограммных УА, а здесь будем иметь в виду только схемное управление.

Определим некоторые общие понятия и функциональное назначение устройства управления. Определим, прежде всего, понятие микрокоманды, а также взаимосвязанных с ним понятий микрооперации и микропрограммы.

**Программа** представляет собой совокупность команд, записанных в определенной последовательности, которая обеспечивает решение данной конкретной задачи на компьютере.

**Команда** - это инструкция для выполнения очередного этапа в вычислениях, а также соответствующее обозначение этой инструкции.

**Операция** - действие, выполняемое в компьютере или процессоре под воздействием команды. При этом каждой команде соответствует операция, выполняемая процессором. Практически в любом процессоре операция не является элементарным действием. Она состоит из последовательности нескольких других элементарных действий, которые называют *микрооперациями*. При этом одна или несколько совместимых во времени микроопераций выполняются за один элементарный интервал времени, представляющий собой период синхронизирующих (тактовых) импульсов и называемый *тактом*.

Таким образом, операция, выполняемая в процессоре под воздействием какой-либо команды, представляет собой ряд микроопераций. Каждая из микроопераций или несколько из них,

выполняемых в один такт, реализуется в устройствах компьютера или процессора под воздействием *микрокоманды*. Следовательно, каждой команде соответствует своя совокупность микрокоманд.

Эту совокупность микрокоманд, или микроинструкций, реализующих данную команду, называют *микропрограммой*. В каждом такте в любом процессоре должна быть сформирована своя микрокоманда, или микроинструкция, которая и обеспечивает выполнение необходимых микроопераций. На рисунке 1 представлена диаграмма, на которой по горизонтальной оси отображена последовательность тактов, а по вертикальной - номера цепей управления процессора при выполнении им некой команды. Каждому такту и каждой цепи управления поставлен в соответствие определенный уровень управляющего сигнала. Например, единичный уровень сигнала является разрешающим, а нулевой - запрещающим. Следует заметить, что для некоторых цепей за разрешающий может быть принят и нулевой уровень.

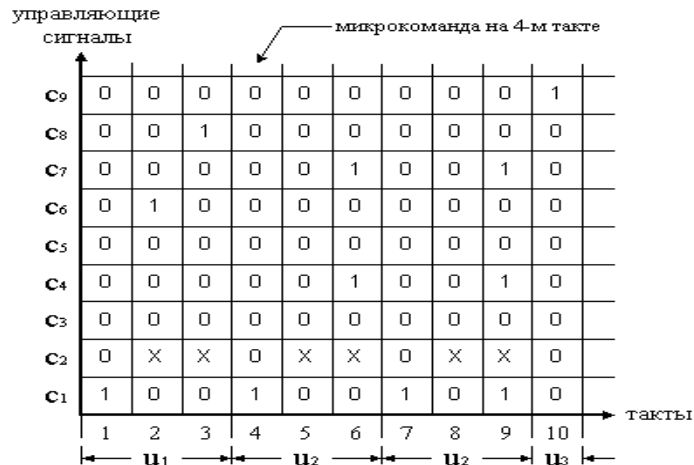


Рисунок 1. Диаграмма распределения управляющих сигналов процессора по цепям управления и по тактам:  $u_1, u_2, u_3$  – коды команд.

Из диаграммы видно, что в каждом такте на управляющие цепи процессора (общее число их может составлять 40 - 60 и более) должна быть подана своя совокупность сигналов управления, разрешающих или запрещающих какую-то микрооперацию. Эту совокупность сигналов управления и называют *микрокомандой*, или *управляющим словом*. Считают,

что в тех тактах, в которых имеются несколько разрешающих сигналов, одновременно выполняется несколько элементарных действий – микроопераций. Но при этом в каждом такте имеется только одно управляющее слово, т.е. реализуется одна микрокоманда.

Таким образом, при выполнении любой команды в процессоре должна быть сформирована совокупность управляющих сигналов, распределенных в пространстве (по цепям управления) и во времени (по тактам). Эта совокупность управляющих сигналов и представляет собой микропрограмму, реализующую данную команду.

Формирование управляющих сигналов для всех цепей управления в каждом такте осуществляется устройством управления процессора. Как видим, задача формирования управляющих сигналов является достаточно сложной и громоздкой, если принять во внимание при этом, что в процессоре имеется достаточно большое число цепей управления и значительное число команд (до 130 и более), причем каждая команда выполняется за несколько тактов (до 5 – 10 и более). Кроме того, устройство управления должно реагировать также на внешние сигналы управления.

В настоящее время для построения устройства управления в процессорах используются два принципа: 1) на основе аппаратной реализации или «жесткой» логики управления и 2) на основе микропрограммной реализации или «гибкой» логики управления. Рассмотрим кратко оба этих принципа. Но вначале необходимо рассмотреть некоторые общие узлы, которые используются при реализации обоих принципов построения устройства управления.

**Регистр команды** предназначен для приема и хранения кода операции команды, считанной из ОЗУ, на время ее выполнения процессором. Разрядность регистра команды равна разрядности шины данных процессора. В связи с этим в 8-разрядных процессорах в регистр команд заносится и хранится там первый байт команд, а в 16-разрядных - первое слово команды. И в том, и в другом случае содержимое регистра

команды несет в себе информацию о коде операции и об используемом в данной операции способе адресации. При этом другие байты, или слова команды, которые несут в себе адресную информацию или являются непосредственными данными, принимаются другими регистрами процессора.

**Дешифратор команды** является обязательным узлом любого устройства управления процессора. Это функциональное комбинационное устройство, предназначенное для расшифровывания кода операции команды для использования в других узлах устройства управления.

В устройствах управления и на основе «жесткой» логики, и на основе «гибкой» логики часто используются так называемые **программируемые логические матрицы (ПЛМ)**. Это логическая сеть, состоящая из двух ступеней: матрицы логических элементов «И», связанной с матрицей логических элементов «ИЛИ», связи между элементами задаются однократно путем «прожига» отдельных «ненужных» перемычек. Рассмотрим упрощенную структуру этого узла (рис. 3.5). Элементы "И" и "ИЛИ" условно показаны на рисунке, а их входы (входы переменных) - соединительными точками. Для получения не только прямых, но и инверсных значений входных переменных ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) на входах ПЛМ включены инверторы. Как известно, любую функцию можно представить в дизъюнктивной нормальной форме, используя двухуровневую комбинационную схему, состоящую из элементов "И" и "ИЛИ". В качестве примера можно записать функции  $y_1, y_2$ , реализуемые в соответствии с соединениями, показанными на рисунке 2:

$$y_1 = x_1 (\bar{x}_2 \cdot x_n \vee x_2 \cdot \bar{x}_n);$$

$$y_2 = x_2 (\bar{x}_1 \vee x_n).$$

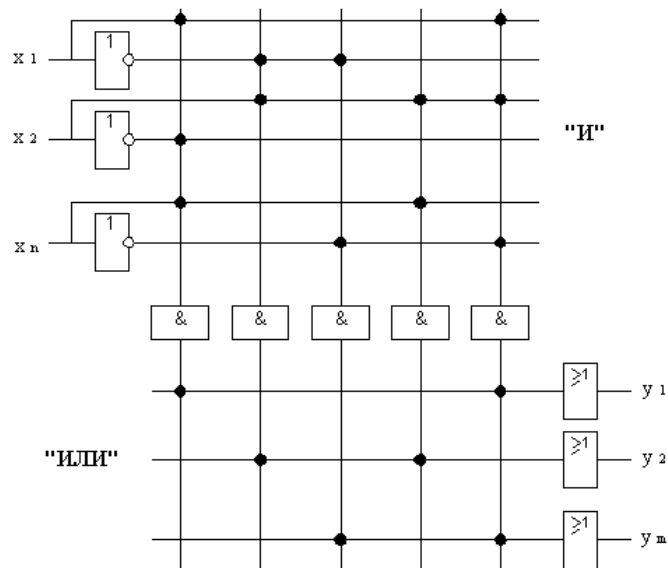


Рисунок 2. Упрощенная структурная схема программируемой логической матрицы

Необходимые соединения входов элементов "И" и "ИЛИ", входящих в матрицы этих элементов, осуществляются либо на заводе-изготовителе – масочное программирование, либо путем программирования пользователем – при применении микросхем ПЛМ с возможностью однократного или многократного программирования.

Из приведенного выше примера и общего принципа построения ПЛМ, следует, что выходным переменным  $y_1$  –  $y_m$  можно поставить в соответствие практически любой набор входных переменных  $x_1$  –  $x_n$  и их функций "И" и "ИЛИ".

Во многих современных процессорах есть узел, который называют *очередью команд*. Очередь команд представляет собой запоминающее устройство, предназначенное для хранения очередных, подлежащих выполнению команд.

Заполнение буферной памяти команд производится в интервалы времени, когда шина данных процессора не занята им для обмена данными с основной памятью или внешними устройствами. Выборка команд из очереди команд производится процессором по мере их выполнения. Таким образом обеспечивается повышение общей производительности процессора, поскольку практически не требуется дополнительных затрат времени на выборку команд из

оперативного запоминающего устройства - очередные команды уже находятся во внутренней буферной памяти процессора.

Полное время на выборку команды с обращением к оперативному запоминающему устройству тратится лишь в тех случаях, когда производится передача управления при реализации условных переходов в программе. В этих случаях производится реинициализация очереди команд и загрузка ее новой последовательностью команд. При этом первая же выбранная из ОЗУ команда становится сразу доступной для выполнения. Одной из разновидностей реализации очереди команд является так называемая КЭШ-память, размещаемая непосредственно на кристалле процессора.

В ряде современных процессоров КЭШ-память используется при этом как буферное запоминающее устройство не только для потока команд, но также и для потока данных. Емкость такого буферного запоминающего устройства достигает 256 байт и более.

### Операционные автоматы.

Приступая к рассмотрению особенностей операционного автомата, представим простейшую его схему, способную выполнять обработку поступающей в него информации по заданному алгоритму (рисунок 3).

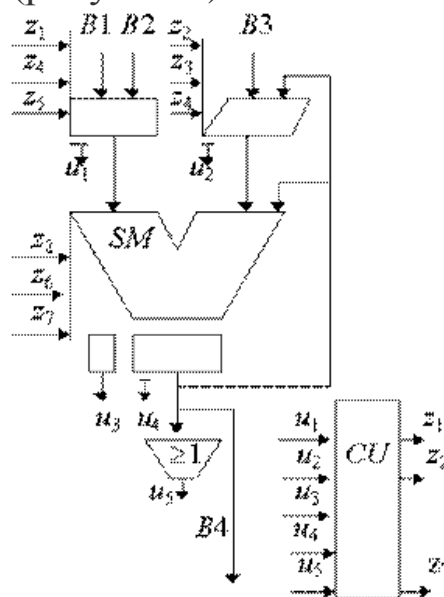


Рисунок 3. - Пример схемы операционного автомата

На рисунке показано несколько регистров, сумматор и другие элементы функциональной схемы, в том числе блок управления *SU*. На стадии логического проектирования всего устройства целесообразно разделить эту схему на две неравные части: операционный автомат и управляющий автомат.

**Операционный автомат** – это устройство, объединяющее все функциональные модули, непосредственно занятые обработкой информации, ее хранением, пересылкой и т.п. У этих модулей имеются *информационные* входы и выходы, *управляющие* входы  $z_1, z_2, \dots$ , а также выходы  $u_1, u_2, \dots$ , которые сигнализируют о состоянии вычислительного процесса (код знака операнда, признак переноса, признак обнуления результата и др.). Эти выходы мы будем называть *осведомительными сигналами*, или *внутренними логическими условиями* устройства.

**Осведомительные сигналы** - это выходные сигналы операционного автомата, информирующие о состоянии вычислительного процесса (код знака операнда, признак переноса, признак обнуления результата и др.)

**Управляющий автомат** - это устройство, вырабатывающее сигналы управления  $z$  по заданной программе и с учетом значений внутренних и внешних логических условий  $u$ , которые для него являются входными переменными. Внешние логические условия задают одну из нескольких возможных в данном устройстве микропрограмм.

В операционном автомате оказывается сосредоточенным основной объем оборудования. На долю управляющего автомата остается сравнительно небольшая часть. При этом аппаратура управления может быть конструктивно рассредоточена по всему устройству. Поэтому с конструктивной точки зрения подобное разделение устройства на две части не оправдано. Тем не менее, на стадии логического проектирования разделение целесообразно потому, что методика проектирования получаемых частей совершенно различна.

Операционный автомат составляется из типовых, хорошо известных модулей, которые не нужно проектировать заново. Что

же касается схемы управления, то ее устройство может сильно отличаться даже в изделиях, близких по своему назначению и свойствам. Кроме того, схема управления, несмотря на относительно небольшой физический объем, имеет относительно более сложные функции, отчего ее синтез требует более серьезного подхода. В частности, именно здесь требуется применение теории автоматов с памятью.

Таким образом, разделение проектируемого устройства на операционный и управляющий автоматы возникает на стадии логического синтеза аппаратуры, а в дальнейшем, при переходе к физическому проектированию, становится ненужным и исчезает.

Операционный автомат для разнообразной обработки операндов содержит цепи приема операндов, регистры операндов и результатов, цепи выдачи результатов, преобразователи кодов, сумматор, схемы сдвига, анализа полученных результатов (рисунок 4).



Рисунок 4. Структурная схема многофункционального ОА

Операционные автоматы делятся на блочные и многофункциональные, синхронные и асинхронные, на автоматы обратного и дополнительного кодов, на автоматы двоичной, десятичной систем исчисления и др.

В блочном автомате для каждой операции предусмотрен соответствующий блок, в многофункциональном автомате единая структура перестраивается с учетом каждой операции.



В автомате с синхронным управлением на любую операцию затрачивается одинаковое время (время самой продолжительной операции), в автомате с асинхронным управлением время каждой операции различно.

Операционный автомат имеет определенные характеристики: набор операций, точность расчетов, быстродействие, код, систему счисления и др.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Изучить теоретический материал.
2. Составить алгоритм управления (биоуправления) выбранной системы искусственного жизнеобеспечения (вентиляция легких, кровообращения, гемодинамики и т.п.)
3. Составить граф-схему алгоритма, полученного в п.2
4. Синтезировать структурную и функциональные схемы управляющего автомата по схеме, полученной в п.3
5. Оформить отчет, включающий: результаты выполнения п.2-4 с пояснениями, краткими ответами на контрольные вопросы, эссе на тему «Использование управляющих автоматов в медицине»

### **Контрольные вопросы.**

1. Что называется управляющим автоматом?
2. Какова роль управляющих автоматов в медицине?
3. Что такое микропрограмма управления?
4. Каким образом по микропрограмме управления синтезируются схемы автоматов?
5. Какие вы знаете разновидности синтеза управляющих автоматов?
6. Какие особенности синтеза управляющих автоматов в системах управления с биологической обратной связью?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ**

**Цель:** изучить типовую структуру системы поддержки принятия решений в процессе управления, смоделировать подобную систему, используя прикладной программный пакет Matlab.

### **Краткие теоретические сведения**

**Система поддержки принятия решений, СППР, Decision Support System, DSS** - компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь людям, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности.

СППР возникли в результате слияния управленческих информационных систем и систем управления базами данных.

Система поддержки принятия решений предназначена для поддержки многокритериальных решений в сложной информационной среде. При этом под многокритериальностью понимается тот факт, что результаты принимаемых решений оцениваются не по одному, а по совокупности многих показателей (критериев) рассматриваемых одновременно. Информационная сложность определяется необходимостью учета большого объема данных, обработка которых без помощи современной вычислительной техники практически невыполнима. В этих условиях число возможных решений, как правило, весьма велико, и выбор наилучшего из них "на глаз", без всестороннего анализа может приводить к грубым ошибкам.

Система поддержки решений СППР решает две основные задачи:

- выбор наилучшего решения из множества возможных (оптимизация),
- упорядочение возможных решений по предпочтительности (ранжирование).

По взаимодействию с пользователем выделяют три вида СППР:

1. **Пассивные.** Системы, которые не выдвигают конкретного предложения, но осуществляют помощь в процессе принятия решений.
2. **Активные.** Такие системы, которые непосредственно участвуют в разработке решения.
3. **Кооперативные.** Системы, которые предполагают с пользователем. Выдвинутое такой системой предложение пользователь имеет возможность изменить и отправить обратно в систему для повторной проверки. Так происходит до тех пор, пока пользователь не одобрит решение, предлагаемое СППР.

Основу СППР составляет комплекс взаимосвязанных моделей с соответствующей информационной поддержкой исследования, экспертные и интеллектуальные системы, включающие опыт решения задач управления и обеспечивающие участие коллектива экспертов в процессе выработки рациональных решений.

Ниже на рис.1 приведен архитектурно-технологическая схема информационно-аналитической поддержки принятия решений:

Поддержка принятия решений

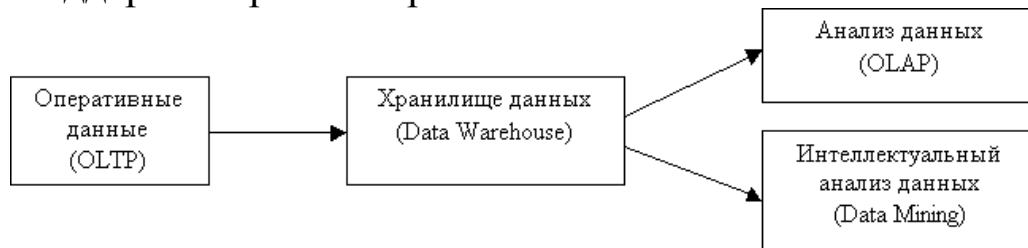


Рис. 1. Архитектурно-технологическая схема СППР

Первоначально информация хранится в оперативных базах данных OLTP-систем. Но ее сложно использовать в процессе принятия решений по причинам, о которых будет сказано ниже. Агрегированная информация организуется в многомерное хранилище данных. Затем она используется в процедурах многомерного анализа (OLAP) и для интеллектуального анализа данных (ИАД). Рассмотрим более подробно каждый элемент этой схемы.

Ясно, что принятие решений должно основываться на реальных данных об объекте управления. Такая информация обычно хранится в оперативных базах данных OLTP-систем. Но эти оперативные данные не подходят для целей анализа, так как для анализа и принятия стратегических решений в основном нужна агрегированная информация. Кроме того, для целей анализа необходимо иметь возможность быстро манипулировать информацией, представлять ее в различных аспектах, производить различные нерегламентированные запросы к ней, что затруднительно реализовать на оперативных данных по соображениям производительности и технологической сложности.

Решением данной проблемы является создание отдельного хранилища данных (ХД), содержащего агрегированную информацию в удобном виде. Целью построения хранилища данных является интеграция, актуализация и согласование оперативных данных из разнородных источников для формирования единого непротиворечивого взгляда на объект управления в целом. При этом в основе концепции хранилищ данных лежит признание необходимости разделения наборов данных, используемых для транзакционной обработки, и наборов данных, применяемых в системах поддержки принятия решений. Такое разделение возможно путем интеграции разъединенных в различных системах обработки данных (СОД) и внешних источниках детализированных данных в едином хранилище, их согласования и, возможно, агрегации.

Концепция хранилищ данных предполагает не просто единый логический взгляд на данные организации, а действительную реализацию единого интегрированного источника данных. Альтернативным по отношению к этой концепции способом формирования единого взгляда на корпоративные данные является создание виртуального источника, опирающегося на распределенные базы данных различных СОД. При этом каждый запрос к такому источнику динамически транслируется в запросы к исходным базам данных, а полученные результаты на лету согласовываются, связываются, агрегируются и возвращаются к

пользователю. Однако, при внешней элегантности, такой способ обладает рядом существенных недостатков.

В основе же концепции оперативной аналитической обработки (OLAP) лежит многомерное представление данных. Термин OLAP ввел E. F. Codd в 1993 году.

По Кодду, многомерное концептуальное представление (multi-dimensional conceptual view) является наиболее естественным взглядом управляющего персонала на объект управления. Оно представляет собой множественную перспективу, состоящую из нескольких независимых измерений, вдоль которых могут быть проанализированы определенные совокупности данных. Одновременный анализ по нескольким измерениям данных определяется как многомерный анализ. Каждое измерение включает направления консолидации данных, состоящие из серии последовательных уровней обобщения, где каждый вышестоящий уровень соответствует большей степени агрегации данных по соответствующему измерению.

Наибольший интерес в СППР представляет интеллектуальный анализ данных, так как он позволяет провести наиболее полный и глубокий анализ проблемы, дает возможность обнаружить скрытые взаимосвязи, принять наиболее обоснованное решение.

Современный уровень развития аппаратных и программных средств с некоторых пор сделал возможным повсеместное ведение баз данных оперативной информации на разных уровнях управления. В процессе своей деятельности промышленные предприятия, корпорации, ведомственные структуры, органы государственной власти и местного самоуправления накопили большие объемы данных. Они хранят в себе большие потенциальные возможности по извлечению полезной аналитической информации, на основе которой можно выявлять скрытые тенденции, строить стратегию развития, находить новые решения.

Интеллектуальный анализ данных (Data Mining) — это процесс поддержки принятия решений, основанный на поиске в данных скрытых закономерностей (шаблонов информации). При

этом накопленные сведения автоматически обобщаются до информации, которая может быть охарактеризована как знания.

В общем случае процесс ИАД состоит из трёх стадий:

1. выявление закономерностей;
2. использование выявленных закономерностей для предсказания неизвестных значений (прогностическое моделирование);
3. анализ исключений, предназначенный для выявления и толкования аномалий в найденных закономерностях.

Новыми компьютерными технологиями, образующими ИАД являются экспертные и интеллектуальные системы, методы искусственного интеллекта, базы знаний, базы данных, компьютерное моделирование, нейронные сети, нечеткие системы. Современные технологии ИАД позволяют создавать новое знание, выявляя скрытые закономерности, прогнозируя будущее состояние систем. Основным методом моделирования социально-экономического развития города является метод имитационного моделирования, который позволяет исследовать городскую систему с помощью экспериментального подхода. Это дает возможность на модели проиграть различные стратегии развития, сравнить альтернативы, учесть влияние многих факторов, в том числе с элементами неопределенности.

Построенная в данной работе модель относится именно к такому классу систем. На ее основе органы местного самоуправления стратегического и тактического уровней получают возможность проанализировать динамику развития сложной социально-экономической городской системы, выявить неочевидные на первый взгляд взаимосвязи, сравнить различные альтернативы, проанализировать аномалии и принять наиболее обоснованное решение.

## **СИМПЛЕКС-МЕТОД**

### ***Теоретические основы симплекс-метода***

Исходя из свойств линейных экстремальных задач, можно заключить, что на принципиальном уровне поиск их решений сводится к последовательному перебору угловых точек множества допустимых планов или, что то же самое, перебору

соответствующих допустимых базисных планов. Средством решения данной проблемы явились прикладные оптимизационные методы, основанные на последовательном, целенаправленном переборе базисных планов ЗЛП.

Классическим методом решения ЗЛП стал симплекс-метод, получивший также в литературе название метода последовательного улучшения плана (упорядоченность обеспечивается монотонным изменением значения целевой функции при переходе к очередному плану), разработанный в 1947 г. американским математиком Джорджем Данцигом.

Пусть стоит задача максимизации

$$f(X) = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (1)$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^n A_j X_j = B \quad (2)$$

$$X_j \geq 0, j=1, \dots, n \quad (3)$$

Предположим, что нам удалось найти опорный план  $X_0$ , в котором, например, первые  $m$  компонент отличны от нуля:

$$X_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{m0}, 0, \dots, 0), \quad (4)$$

и соответствующий базис  $B = (A_1, A_2, \dots, A_m)$ .

Попытаемся выбрать другую систему базисных векторов с целью построения нового опорного плана, в котором  $k$ -я переменная ( $k > m$ ) принимает значение  $Q > 0$ :

$$X(Q) = (X_1(Q), X_2(Q), \dots, X_m(Q), 0, \dots, Q, \dots, 0) \quad (5)$$

Подставляя (4) в (2), имеем

$$\sum_{j=1}^m A_j X_j^0 = B \quad (6)$$

Подставив (5) в (2), получаем

$$\sum_{j=1}^m A_j X_j(\Theta) + A_k \Theta = B \quad (7)$$

Разложим вектор  $A_k$  по векторам исходного базиса

$$A_k = \sum_{j=1}^m Z_{jk} A_j \quad (8)$$

В общем случае для получения коэффициентов такого разложения придется решать систему  $m$  уравнений с  $m$  неизвестными, которая имеет единственное решение, поскольку базисные векторы линейно независимы и соответствующая матрица имеет ненулевой определитель. Заметим, что в ситуации, когда базисные векторы являются единичными (образуют единичную матрицу), искомые коэффициенты совпадают с компонентами исходного вектора; поэтому в дальнейшем мы предпочтем работать с единичным базисом.

Подставляя (6) и (8) в (7), получаем

$$\sum_{j=1}^m A_j X_j(\Theta) + \Theta \sum_{j=1}^m A_j Z_{jk} = \sum_{j=1}^m A_j X_j^0, \quad (9)$$

откуда имеем

$$\sum_{j=1}^m A_j [X_j(\Theta) - X_j^0 + \Theta Z_{jk}] = 0. \quad (10)$$

Так как система уравнений (10) имеет единственное решение, то получаем представление первых  $m$  компонент нового плана

$$X_j(\Theta) = X_j^0 - \Theta Z_{jk}, \quad j = 1, \dots, m. \quad (11)$$

Естественно потребовать неотрицательность компонент нового плана. Так как нарушение неотрицательности в (2.11) может возникнуть лишь при  $Z_{jk} > 0$ , то значение  $Q$  нужно взять не превышающим наименьшего из отношений  $X_j^0 / Z_{jk}$  к положительным  $Z_{jk}$ .



Если к тому же учесть, что число положительных (базисных) компонент опорного плана должно оставаться равным  $m$ , то одну из первых  $m$  (ненулевых) компонент исходного плана обращаем в нуль выбором

$$\Theta = \min_{Z_{jk} > 0} \frac{X_j^0}{Z_{jk}} \quad (12)$$

Подставляя (11) в (1), имеем

$$L\{X(\Theta)\} = \sum_{j=1}^n C_j X_j(\Theta) = \sum_{j=1}^m C_j \{X_j^0 - \Theta Z_{jk}\} + C_k \Theta \quad (13)$$

Если обозначить

$$Z_k = \sum_{j=1}^m C_j Z_{jk}, \quad (14)$$

$$D_k = Z_k - C_k, \quad (15)$$

то (13) примет вид

$$L\{X(\Theta)\} = L(X^0) - \Theta D_k \quad (16)$$

Из полученных соотношений напрашиваются следующие выводы.

Критерий 1 (критерий оптимальности). Если все  $D_{ki}=0$ , то выбранный план для задачи максимизации является оптимальным.

Критерий 2. Если обнаруживается некоторое  $D_k < 0$  и хотя бы одно из значений  $Z_{jk} > 0$ , то переход к новому плану увеличит значение целевой функции.

Этот вывод с очевидностью следует из (16); в такой ситуации согласно (12) полагаем  $k$ -ю переменную равной  $Q$  и преобразуем значения остальных (базисных) переменных в соответствии с (11).

Критерий 3. Если обнаруживается некоторое  $D_k < 0$ , но все  $Z_{jk}=0$ , то линейная форма задачи не ограничена по максимуму.

Этот вывод следует из того, что согласно (11) компоненты нового плана сохраняют неотрицательность при любом  $Q > 0$  (в том числе и при сколь угодно большом) и согласно (16)

появляется возможность неограниченного изменения значения целевой функции.

Предположение о том, что базисными являются первые  $m$  компонент плана, не является принципиальным, и указание диапазона по  $j$  от 1 до  $m$  в (11)-(15) можно заменить на указание о принадлежности к базису “jОБ”.

Если все опорные планы задачи являются невырожденными (число положительных компонент равно  $m$ ), то  $Q$  отлично от нуля и переход к новому плану согласно (16) изменяет значение целевой функции, что гарантирует достижение экстремума за конечное число шагов. При наличии вырожденных планов возможно т. н. заикливание (возврат к ранее рассмотренным планам), но на практике заикливание никогда не возникало.

### **Прямой алгоритм симплексного метода**

Пусть исходная задача приведена к канонической форме и начальный базис образует единичную матрицу. Тогда базисные компоненты опорного плана совпадают с правыми частями ограничений и коэффициенты  $Z_{jk}$  разложения вектора  $X_k$  по такому базису совпадают с компонентами этого вектора.

Для единообразия описания вычислительной процедуры в дальнейшем будем пользоваться т.н. симплексной таблицей вида:

<b>C</b>	<b>Базис</b>	<b>План</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>		<b>Cm</b>	<b>Cm+1</b>		<b>Ck</b>		<b>Cn</b>
<b>баз</b>	<b>плана</b>	<b>X</b>	<b>X1</b>	<b>X2</b>		<b>Xm</b>	<b>Xm+1</b>		<b>Xk</b>		<b>Xn</b>
<b>C1</b>	<b>X1</b>	<b>B1</b>	1	0		0	<b>Z1m+1</b>		<b>Z1k</b>		<b>Z1n</b>
<b>C2</b>	<b>X2</b>	<b>B2</b>	0	1		0	<b>Z2m+1</b>		<b>Z2k</b>		<b>Z2n</b>
<b>Cm</b>	<b>Xm</b>	<b>Bm</b>	0	0		1	<b>Zmm+1</b>		<b>Zmk</b>		<b>Zmn</b>
<b>Zk</b>		<b>L(X)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>		<b>Zm</b>	<b>Zm+1</b>		<b>Zk</b>		<b>Zn</b>
<b>Dk</b>			<b>D1</b>	<b>D2</b>		<b>D m</b>	<b>D m+1</b>		<b>Dk</b>		<b>Dn</b>

В центральной части таблицы записываются коэффициенты при неизвестных в ограничениях, в столбце  $X$  - правая часть ограничений (базисные компоненты плана), в первой строке - коэффициенты линейной формы, во второй строке – переменные,

входящие в целевую функцию и систему ограничений. Основное поле симплекс таблицы - коэффициенты при неизвестных в ограничениях. В первом столбце для удобства вычислений будем заносить коэффициенты линейной формы при базисных переменных, указанных во втором столбце (умножение его на столбец  $X$  (свободные члены  $V_i \geq 0$ ) с суммированием дает значение  $L(X)$ ; аналогичное умножение его на столбец  $X_k$  даст  $Z_k$ ). Последняя строка получается вычитанием из предыдущей строки элементов первой строки таблицы и позволяет судить об оптимальности плана.

Т.к. выбор типа искомого экстремума (максимума или минимума) носит относительный характер, то при решении задач максимизации/минимизации в последней строке должны быть только неотрицательные элементы.

Обратим внимание на определение начального опорного плана. Пусть задача приведена к канонической форме и компоненты вектора правой части неотрицательны. Если в системе векторов коэффициентов при переменных (матрице  $A$ ) обнаруживается подсистема, образующая единичную подматрицу, то эти векторы образуют базис опорного плана и вектор правой части определяет базисные компоненты этого плана.

Если такой единичной подматрицы не обнаруживается, то либо придется перебирать все подсистемы  $m$  уравнений с  $m$  неизвестными в надежде обнаружить неотрицательные решения, либо прибегнуть к методу искусственного базиса.

В последнем случае в ограничения добавляются неотрицательные, т.н. искусственные переменные так, чтобы возникла единичная подматрица коэффициентов, и эти переменные включают в линейную форму с коэффициентом -  $M$  для задачи максимизации, где  $M > 0$  - сколь угодно большое число.

Полученная  $M$ -задача решается до получения оптимального плана.

Если в оптимальном плане  $M$ -задачи значения искусственных переменных равны нулю, то значения остальных компонент образуют оптимальный план исходной задачи.

Если в оптимальном плане  $M$ -задачи значение хотя бы одной из искусственных переменных отлично от нуля, то исходная задача не имеет ни одного плана (ее ограничения противоречивы).

Если некоторая задача решается прямым алгоритмом симплексного метода, то решение сопряженной задачи можно видеть в строке  $Z$  конечной симплексной таблицы в позициях, соответствующих начальному единичному базису.

**МЕТОД ГОМОРИ.** При решении многих задач (планирование мелкосерийного производства, распределение кораблей по путям сообщения, выработка суждений типа "да-нет" и т.п.) нецелочисленное решение не имеет смысла. Попытка тривиального округления до целых значений приводит либо к нарушению ограничений задачи, либо к недоиспользованию ресурсов. Как мы имели возможность убедиться, для произвольной линейной программы (за исключением программ типа классической транспортной задачи, где коэффициенты матрицы ограничений равны 1 или 0) гарантировать целочисленность решения невозможно.

В случае двухмерной задачи проблема решается относительно просто путем выявления всех целочисленных точек, близких к границе множества планов, построения выпуклого множества планов, содержащего все целочисленные планы и решения задачи над этим множеством.

В общем случае выдвигается идея последовательного отсека нецелочисленных оптимальных планов: обычным симплексным методом отыскивается оптимальный план и, если он нецелочисленный, строится дополнительное ограничение, отсекающее найденный оптимальный план, но не отсекающее ни одного целочисленного плана.

Эта идея, принадлежащая Д. Данцигу и Р. Гомори, впервые была представлена в форме дополнительного ограничения:

$$\sum_{j \in J} x_j \geq 1$$

(сумма небазисных компонент оптимального плана должна быть отлична от нуля; хотя бы одна из небазисных компонент

должна быть ненулевой). В самом деле, оптимальный план с нулевыми значениями небазисных компонент этому условию не удовлетворяет, что подтверждает отсечение этого плана от исходного множества.

К сожалению, для абсолютного большинства задач скорость сходимости процесса таких отсечений мала. Потому Р. Гомори предложена другая форма дополнительного ограничения. Так, если компонента плана, определяемая  $k$ -м уравнением системы ограничений, нецелочисленна, то добавляется ограничение

$$f_k = \sum_{j \notin \text{Баз}} f_{kj} X_j - S^* , \quad S^* \geq 0$$

где  $f_k$  - дробная часть компоненты плана (правой части ограничения) и  $f_{kj}$  - дробная часть коэффициента при  $X_j$  (целая часть числа – наибольшее целое, не превышающее это число; дробная часть числа равна разности между числом и его целой частью),  $S^*$  - новая дополнительная переменная.

Можно уменьшить объем преобразований, если руководствоваться следующими правилами:

1) выбирать в качестве базового для построения дополнительного ограничения уравнение, определяющее компоненту плана с наибольшей дробной частью;

2) для ввода в базис опорного плана расширенной задачи выбирать переменную, для которой достигается минимум из отношений абсолютных значений  $D_j$  к значениям  $f_{kj}$ ;

3) если одна из ранее введенных дополнительных переменных вошла в базис, ее и соответствующее ей уравнение можно отбросить (эта ситуация связана с появлением более жесткого условия, перекрывающего действие ранее введенного).

Появление дополнительного ограничения и дополнительной переменной вновь приводит к проблеме выбора начального опорного плана расширенной задачи и к использованию с этой целью искусственной переменной. Следует заметить, что если при поиске переменной, исключаемой из базиса, значение  $Q$  (определяемое с учетом дополнительного ограничения) соответствует этому ограничению, то можно отказаться от

использования искусственной переменной (она все равно выведется из базиса на этом же шаге решения).

Заметим, что для целочисленных программ может обнаружиться отсутствие целочисленных планов (противоречивость ограничений).

Для предложенного здесь метода доказана конечность процесса отсечений, но число этих отсечений непредсказуемо (вполне может обнаружиться быстрое решение задач с десятками переменных и ограничений и фантастически длительное для задач небольших размеров).

### Порядок выполнения работы

Отличительной особенностью разработанной программы является ее графический интерфейс (Рисунок 2), обеспечивающий максимально удобную работу и позволяющий работать с программой даже не посвященным в программирование, математику людям.

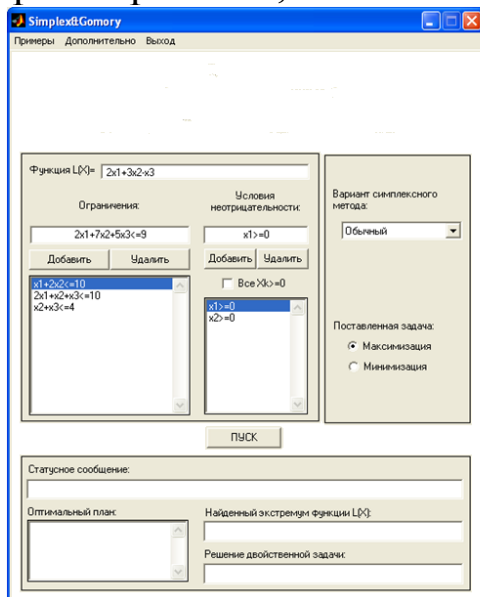


Рисунок 2. Графический интерфейс программы

Для запуска проекта необходимо запустить среду MatLAB и указать путь к каталогу с программой. Затем необходимо запустить графический интерфейс (Рисунок 1) для чего в консоли MatLAB'a требуется ввести `guide` и в открывшемся окошке (Рисунок 3) выбрать вкладку «Открыть существующий GUI» и

указав путь к GUI-интерфейсу «MainSimplexForm.fig» нажать кнопку «ОК».

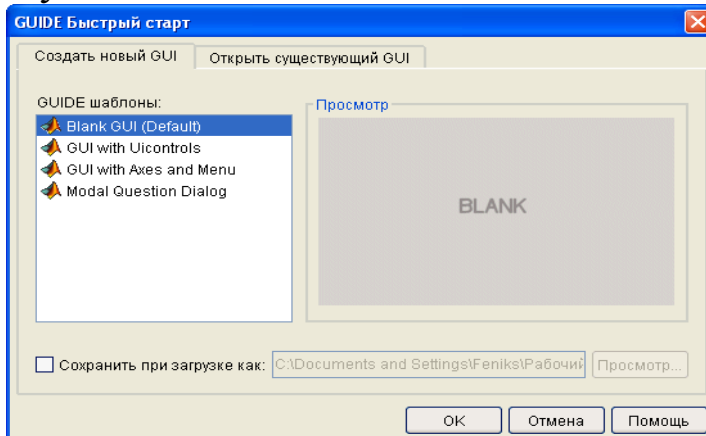


Рисунок 3. GUIDE - среда разработки и работы с GUI-интерфейсами MatLAB

В итоге появится макет интерфейса (Рисунок 3) для запуска которого достаточно нажать комбинацию клавиш «Ctrl+T» или зеленую стрелочку на панели под главным меню. После запуска перед вами появится полноценный графический интерфейс (Рисунок 4).

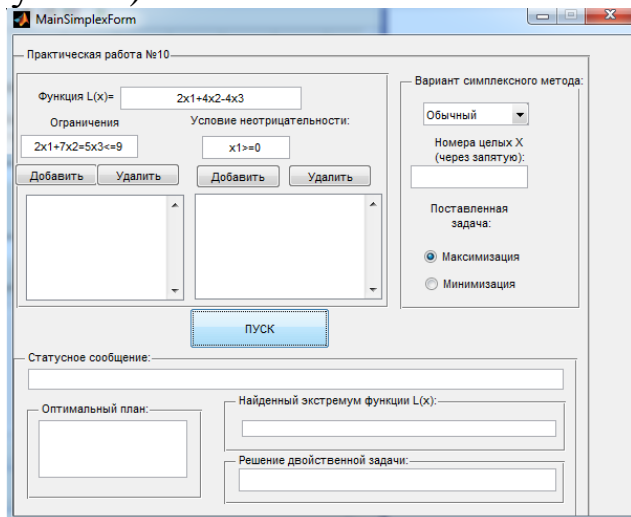
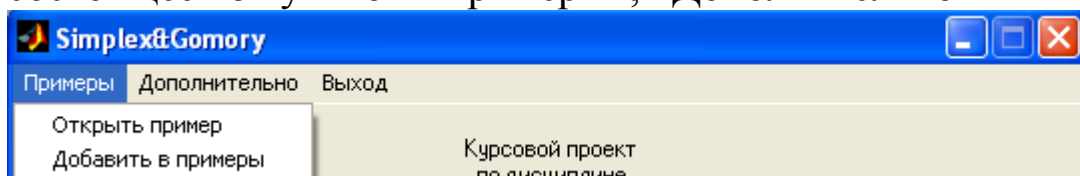


Рисунок 4. Макет GUI-интерфейса

### Описание графического интерфейса

Вверху формы расположено главное меню (Рисунок 5), состоящее из пунктов «Примеры», «Дополнительно» и «Выход».



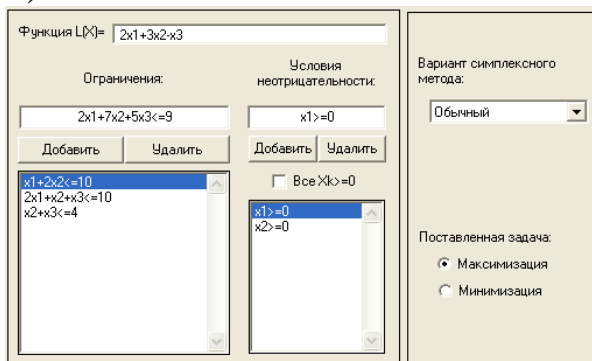
## Рисунок 5. Главное меню

Пункт «Примеры» позволяет загрузить или создать пример работы с программой. Примеры хранятся в текстовых файлах с расширением «matex» содержащих целевую функцию, ограничения и условия неотрицательности.

Пункт «Дополнительно» позволяет пользователям операционной системы Windows получить доступ к Калькулятору, Блокноту и некоторым другим приложениям.

Пункт «Выход» закрывает среду MatLAB.

Для ввода функции, ограничений, условий неотрицательности и выбора метода используется центральная часть формы (Рисунок 6).



Функция  $L(X) = 2x_1 + 3x_2 + x_3$

Ограничения:  $2x_1 + 7x_2 + 5x_3 = 9$

Условия неотрицательности:  $x_1 \geq 0$

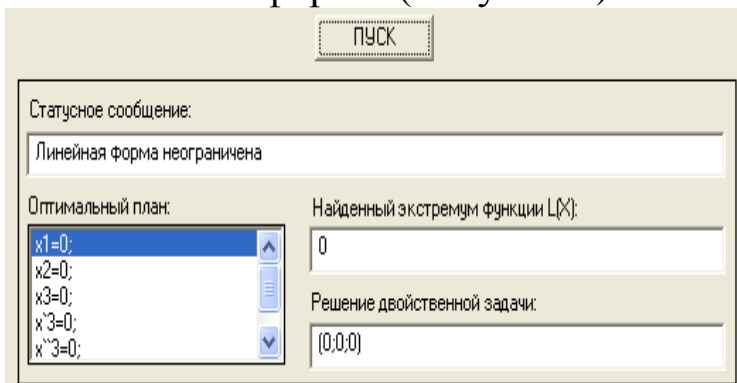
Вариант симплексного метода: Обычный

Поставленная задача:
 

- Максимизация
- Минимизация

Рисунок 6. Здесь можно ввести исходные данные и выбрать метод решения

Для запуска метода и просмотра результатов его работы служит нижняя часть формы (Рисунок 7).



ПУСК

Статусное сообщение:  
Линейная форма неограничена

Оптимальный план:  
 $x_1 = 0;$   
 $x_2 = 0;$   
 $x_3 = 0;$   
 $x'3 = 0;$   
 $x''3 = 0;$

Найденный экстремум функции  $L(X)$ :  
0

Решение двойственной задачи:  
(0, 0, 0)

Рисунок 7. Здесь можно запустить метод и посмотреть результат его работы



Особое внимание надо обратить на статусное сообщение. Поля «Оптимальный план» и «Экстремум функции» будут заполнены последними значениями, но судить об их верности можно только прочитав статусное сообщение! Решение двойственной задачи отображается только для обычного варианта симплексного метода.

В случае если вы хотите воспользоваться частично целочисленным методом стоит обратить внимание на ввод требуемых иксов (Рисунок 8).

Рисунок 8. Ввод номеров требуемых целых иксов

Необходимо через пробел вводить номера иксов, которые вы хотите видеть целыми.

### Описание созданных функций

В ходе разработки проекта были написаны следующие функции:

`parser_input` – функция разделения строки типа “ $2x_1+5x_2-7x_3$ ” на массив номеров иксов и массив коэффициентов при этих иксах;

`parser_allogr` – функция канонизации, формирующая составляющие симплексной таблицы из введенных функции, ограничений, условий неотрицательности;

`load_example` – функция чтения файла с примером;

`save_example` – функция записи файла с примером;

`simple_simplex` – функция, реализующая простой симплекс-метод;

`gomory_simplex` – функция, реализующая метод Гомори;

`MainSimplexForm` – функция, связанная с графическим интерфейсом и содержащая основные вызовы остальных функций.

Все перечисленные выше функции снабжены подробной справкой и для более подробного ознакомления с ними достаточно в консоли MatLAB ввести: help имя\_функции

Данные функции можно использовать в других программах написанных для MatLAB, т.к. они работают в проекте как «автономные модули».

### Индивидуальные задания

1. Выпишите задание согласно варианта из таблицы «Индивидуальные задания».
2. Составьте программу с указанным интерфейсом, опираясь на «Порядок выполнения работы».
3. Оформите отчет.

№ варианта	Функция	Ограничения	Условия неотрицательности	Вариант симплексного метода
1	$2x_1+6x_2-9x_3$	$2x_1+3x_2-6x_3 \leq 0$	$x_1 \geq 0$	Обычный
2	$6x_1+4x_2-x_3$	$6x_1+2x_2+4x_3 \leq 2$	$x_1 \geq 0$	Обычный
3	$2x_1-x_2+4x_3$	$2x_1+x_2+5x_3 \leq 2$	$x_1 \geq 0$	Частично целочисленный
4	$3x_1+4x_2+5x_3$	$2x_1+2x_2+4x_3 \leq 4$	$x_1 \geq 0$	Обычный
5	$4x_1-5x_2-x_3$	$2x_1-3x_2-2x_3 \leq -1$	$x_1 \geq 0$	Обычный
6	$5x_3+2x_1-5x_3$	$3x_3+x_2-3x_3 \leq 1$	$x_1 \geq 0$	Частично целочисленный
7	$2x_3+x_2-5x_3$	$x_3-x_2-6x_3 \leq -1$	$x_1 \geq 0$	Обычный
8	$4x_1-4x_2+4x_3$	$2x_1-2x_2+2x_3 \leq 2$	$x_1 \geq 0$	Обычный
9	$x_1-2x_4+4x_3$	$2x_1-x_2+3x_3 \leq 1$	$x_1 \geq 0$	Частично целочисленный
10	$3x_1+3x_2-5x_3$	$x_1+x_2+2x_3 \leq 3$	$x_1 \geq 0$	Обычный
11	$4x_1+3x_2+2x_3$	$3x_1+x_2+3x_3 \leq 3$	$x_1 \geq 0$	Обычный
12	$2x_1-4x_2+6x_3$	$2x_1-2x_2+5x_3 \leq -1$	$x_1 \geq 0$	Частично целочисленный

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой системы поддержки принятия решений? Для чего он предназначены?
2. Какие задачи решают СППР?
3. Какие виды СППР выделяют, рассматривая их возможности при взаимодействии с пользователем?

4. Что представляет собой архитектурно-технологическая схема СППР? Из каких структурных единиц она состоит?
5. Какую проблему решает создание отдельного хранилища данных (ХД)?
6. Какой постулат лежит в основе концепции оперативной аналитической обработки (OLAP)?
7. Из каких стадий состоит процесс интеллектуального анализа данных (ИАД)?
8. Каковы основные теоретические выкладки из симплекс-метода? Опишите критерии, характеризующие данные, полученные в результате использования данного метода.
9. Что представляет собой прямой алгоритм симплексного метода?
10. В чём состоит особенность метода Гомори?

### Тесты.

#### 1. Что представляют собой активные СППР?

- а) Системы, которые не выдвигают конкретного предложения, но осуществляют помощь в процессе принятия решений;
- б) Такие системы, которые непосредственно участвуют в разработке решения;
- в) Системы, которые связываются с пользователем, выдвигая предложения до тех пор, пока оно не будет принято пользователем.

#### 2. Если компонента плана, определяемая $k$ -м уравнением системы ограничений, нецелочисленна, то, согласно методу Гомори, добавляется ограничение:

- а)  $f_k = \sum_{j \in \text{Баз}} f_{kj} X_j - S^*, \quad S^* \geq 0;$
- б)  $f_k = \sum_{j \in \text{Баз}} f_{kj} X_j - S^*, \quad S^* \leq 0;$
- в)  $f_k = \sum_{j \in \text{Баз}} f_{kj} X_j + S^*, \quad S^* \geq 0;$
- г)  $f_k = \sum_{j \in \text{Баз}} f_{kj} X_j + S^*, \quad S^* \leq 0;$

#### 3. Критерию оптимальности отвечает следующее условие:

- а)  $D_k < 0;$
- б)  $Z_{jk} > 0;$

в)  $D_{ki}=0$ ,

г)  $D_k < 0$ , все  $Z_{jk}=J_0$ .

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 11. КОДИРОВАНИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

**Цель работы:** освоение знаниями и навыками кодирования цифровых и аналоговых сигналов с учетом особенностей регистрации с биологического объекта в медицинских целях в кибернетических системах.

### **Краткие теоретические сведения.**

*Канал* есть совокупность технических средств между источником сообщений и потребителем. Технические устройства, входящие в состав канала, предназначены для того, чтобы сообщения дошли до потребителя наилучшим образом – для этого сигналы преобразуют. Такими полезными преобразованиями сигнала являются модуляция, рассмотренная ранее и преобразование непрерывных сигналов в дискретные. Соответственно, каналы классифицируют по состояниям – *непрерывные* и *дискретные*.

Сигналы, несущие информацию о состоянии какого-либо объекта или процесса, по своей природе непрерывны, как непрерывны сами процессы. Поэтому такие сигналы называют аналоговыми, т.к. они являются аналогом отображаемого ими процесса или состояний объекта. Число значений, которое может принимать аналоговый сигнал, бесконечно. Соответственно, каналы, по которым передаются эти сигналы, также являются аналоговыми.

В АТС задача часто сводится к тому, чтобы различить конечное число состояний объекта, например, занята рельсовая цепь или свободна. Для передачи этого числа состояний достаточно сравнить принимаемый сигнал с некоторым опорным сигналом. Если он больше опорного, объект находится в одном состоянии, меньше – в другом. Чем больше число состояний объекта, тем больше должно быть опорных уровней.

С другой стороны, информацию о состоянии объекта потребителю достаточно получать не непрерывно во времени, а периодически, и, если период опроса увязать со скоростью изменения состояний объекта, то потребитель не будет иметь потерь информации.

В результате преобразований непрерывного сигнала, называемых *квантованием* и *дискретизацией* получают *отсчеты сигнала, рассматриваемые как числа в той или иной системе счисления. Эти отсчеты являются дискретными сигналами.* Эти числа преобразуют в кодовые комбинации электрических сигналов, которые и передают по линии связи как непрерывные. При использовании в качестве носителя постоянного состояния получают последовательность видеоимпульсов. При необходимости этой последовательностью модулируют гармоническое колебание и получают последовательность радиоимпульсов.

**Под кодированием понимают преобразование дискретных сигналов в последовательность или комбинацию некоторых символов. Символ кода – это элементарный сигнал, отличающийся от другого символа кодовым признаком.** Число значений кодовых признаков называется основанием кода –  $m$ . Число символов в кодовой комбинации  $n$  определяет длину кода. Если длина кода для всех комбинаций постоянна, код называется равномерным. Чаще всего используются равномерные двоичные ( $m=2$ ) коды. Максимальное число кодовых комбинаций при равномерном кодировании:  $N = m^n$ .

Представление непрерывных сигналов отсчетами, а отсчетов – совокупностью символов называется *цифровыми видами модуляции*. Из них наиболее распространенными являются *импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)* и *дельта-модуляция (ДМ)*.

Рассмотрим ИКМ. Пусть нам надо передать непрерывный сигнал с диапазоном изменения от нуля до 15 вольт. Считаем, что нам достаточно передать 16 уровней, т.е.  $N = 16$ . Отсюда, если  $m = 2$ , то  $n = 4$ . Кодруем: 0 В – 0000, 1 В – 0001, 2 В – 0010, 3 В – 0011 и т.д. Эти числа в виде импульсов и пауз поступают в линию связи, затем в приемнике декодируются и превращаются, если нужно, снова в непрерывный сигнал. Преобразование непрерывного сигнала в дискретный осуществляется в устройствах, называемых *аналого-цифровыми*

преобразователями (АЦП), обратные преобразования – в устройствах *цифро-аналогового преобразования* (ЦАП).

При квантовании диапазон изменения сигнала по уровню разбивают на  $N$  квантов. Величину  $N$  выбирают таким образом, чтобы значение отсчета можно было передать двоичным  $n$ -разрядным числом:  $N = 2^n$ .

Наиболее простой способ квантования – равномерный показан на рисунке 1. Сигнал занимает диапазон значение

от  $a$  до  $b$ . Величина кванта определяется по формуле: 
$$\Delta = \frac{b-a}{N} .$$

Переход от уровня к уровню происходит скачком в момент пересечения непрерывным сигналом  $x(t)$  порогового уровня  $U_{\text{пор}}$ , обычно размещенного в середине между квантами (рисунок 2).



Рисунок 1

Вследствие квантования появляются методические погрешности, называемые *шумом квантования*. Абсолютное значение погрешности  $d_k$  в каждый момент времени определяется разностью между квантованным значением  $x(t_k)$  и мгновенным значением  $x(t)$ . Во многих случаях шум квантования имеет форму пилообразного напряжения, поэтому плотность его

распределения близка к равномерной: 
$$f(\delta_k) = \frac{1}{\Delta} .$$

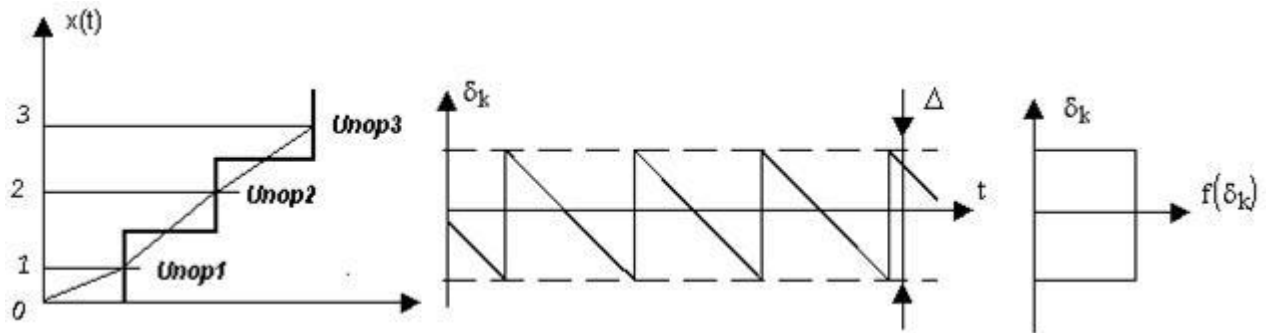


Рисунок 2

Среднее значение шума  $\bar{\delta}_k = 0$  .

Для уменьшения шума квантования применяется неравномерное квантование, когда наиболее вероятные значения сигнала передаются с меньшим шагом, а менее вероятные – с большим. В среднем погрешность квантования (шум) оказывается меньше.

### Дискретизация по времени.

При дискретизации выборками в качестве координат сигнала используются текущие (мгновенные) значения сигнала в фиксированные моменты времени, т. е.  $s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_k)$ . Координаты  $s_k = s(t_k)$  обычно называют *выборками*, или *отсчетами*, моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k$  – *точками опроса*, а сам процесс формирования таких координат – *опросом* или *дискретизацией* (рисунок 3). Заметим, что последовательность выборок может рассматриваться как сигнал с амплитудно-импульсной модуляцией.

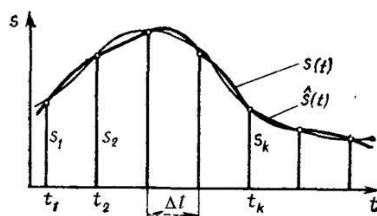
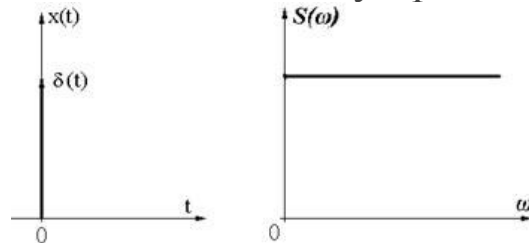


Рисунок 3

Мгновенные выборки могут быть представлены в виде дельта-функций  $\delta(t_k)$ . площадь которых равна амплитуде выборки  $s(t_k)$  в момент отсчета.



Дельта-функция – это прямоугольный импульс с бесконечно малой длительностью и бесконечно большой амплитудой. Площадь импульса равна единице. Такого сигнала не существует, но он удобен при анализе сигналов и устройств связи.



При дискретизации сигналов площадь дельта-функций равна амплитуде выборки  $s(t_k)$  в момент отсчета. При регулярном опросе точки опроса  $t_1, t_2, \dots, t_k$  образуют на оси времени  $t$  регулярную последовательность с интервалом времени  $Dt$ , называемым *интервалом дискретизации*.

*Частота дискретизации*  $f_d = 1/Dt$  при регулярном дискретном представлении выбирается заранее и остается неизменной в течение всего сеанса работы системы.

Основополагающей теоремой теории дискретного регулярного представления по выборкам является теорема Котельникова. В соответствии с этой теоремой возможно со сколь угодно высокой точностью восстановить любой непрерывный детерминированный или случайный процесс (сигнал)  $s(t)$  по его дискретным регулярным выборкам при следующих условиях:

1. Процесс имеет ограниченный спектр (например, от 0 до  $F_c$  (частоты среза – наибольшей частоты в спектре процесса));
2. Процесс наблюдается бесконечное время ( $T \rightarrow \infty$ );
3. Выборки сообщения формируются с частотой дискретизации  $f_d \geq 2f_c$ ;
4. Восстановление процесса ведется по точным (незашумленным) значениям выборок в форме ряда Котельникова

$$\hat{s}(t) = s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(t_k) \frac{\sin 2\pi f_c (t - t_k)}{2\pi f_c (t - t_k)},$$

где  $t_k = kDt$  – момент взятия отсчета.

Особенностью ряда является то, что в моменты  $t_k$  значения ряда определяются только  $k$ -ым членом разложения, т.к. все другие члены ряда в этот момент обращаются в нуль:

$$\frac{\sin 2\pi f_c(t-t_k)}{2\pi f_c(t-t_k)} = \begin{cases} 1 & t = k\Delta t \\ 0 & \text{при } t \neq k\Delta t \end{cases}.$$

Такая функция (вида  $\sin x/x$ ) называется *функцией отсчетов*.

При передаче непрерывных сообщений импульсными методами всегда встает вопрос не только о дискретном представлении таких сообщений на передающей стороне выборками, но и об его восстановлении на приемной стороне по переданным дискретным значениям (выборкам). Этот процесс восстановления называют *интерполяцией*.

Графически процесс восстановления сигнала по отсчетам и соответствующим им функциям отсчетов приведен на рисунке 4.

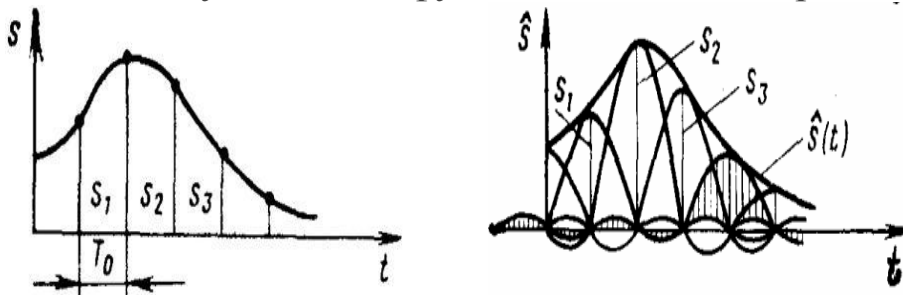


Рисунок 4

Видно, что при восстановлении используются как правые, так и левые ветви функции отсчетов. Практическая реализация приемника, восстанавливающая непрерывный сигнал, возможна, если в нем с приходом каждого нового импульса-отсчета генерировать соответствующую функцию. Функция вида  $\sin x/x$  представляет собой импульсную реакцию идеального фильтра низких частот. Поэтому в качестве приемника можно использовать ФНЧ.

На рисунке 5 показаны графики функции отсчетов, передаточные функции и импульсные реакции идеального (1) и реального (2) ФНЧ.

Отсутствие левых ветвей на графиках импульсной реакции объясняется невозможностью получения отклика раньше воздействия. При восстановлении происходит задержка сигнала на  $Dt$ .

Таким образом, если в приемнике поместить ФНЧ и пропустить через него последовательность с частотой  $2f_c$  коротких импульсов, амплитуды которых пропорциональны отсчетам непрерывного сигнала, то в ФНЧ будут суммироваться отклики и будет воспроизведен исходный сигнал.

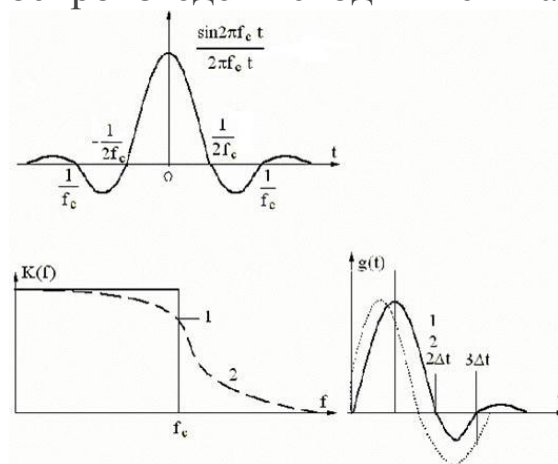


Рисунок 5

Следует отметить, что теорема Котельникова дает лишь *предельные (потенциальные) соотношения* для определенных идеализированных условий, основными из которых являются ограниченность спектра и бесконечное время наблюдения. К этим предельным соотношениям можно лишь стремиться, никогда их не достигая.

При воспроизведении непрерывного сигнала из дискретного возможны ошибки за счет следующих причин:

1. Время сигнала  $T$  конечно, следовательно, его спектр бесконечен, поэтому его ограничивают диапазоном  $0 \dots f_c$ , где сосредоточена основная часть энергии сигнала. Относительная

погрешность  $e(t)$  при этом будет пропорциональна отсеченной

$$\varepsilon(t) = \frac{\int_0^{\infty} G(f) df - \int_0^{f_c} G(f) df}{\int_0^{\infty} G(f) df} ;$$

части энергии:

2. Число членов ряда конечно, и бесконечный ряд Котельникова заменяется приближенным:

$$\hat{x}(t) = \sum_{k=1}^{n=T/\Delta t} x(t_k) \frac{\sin 2\pi f_c(t-t_k)}{2\pi f_c(t-t_k)} ;$$

3. Отклик реального ФНЧ отличается от кривой вида  $\sin x/x$ .

Абсолютная погрешность восстановления  $|d(t)|$  на отрезке существования сигнала неравномерна: в моменты  $t_k$  она близка к нулю, нарастает к середине интервала между отсчетами и увеличивается к краям дискретизируемого отрезка, где отсекаются ветви функции отсчетов. На рисунке 6 показан вид восстановленного сигнала с неограниченным спектром и график абсолютной погрешности  $|d(t)|$ :

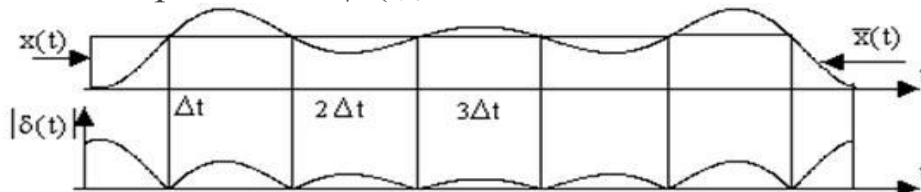


Рисунок 6

При передаче отсчетами случайных сигналов интервал дискретизации можно определять через интервал корреляции  $Dt$ :  $Dt < Dt$ ;  $T \gg Dt$ . (критерий Железнова).

### Классификация каналов

В теории связи классификация по состоянию сигналов представляет наибольший интерес. Различают следующие виды каналов:

- а) непрерывные по состояниям, на входе и выходе которых сигналы непрерывны;
- б) дискретные по состояниям – на входе и выходе сигналы дискретны;

в) дискретно-непрерывные – дискретные со стороны входа и непрерывные со стороны выхода или наоборот.

Всякий дискретный или дискретно-непрерывный канал имеет в своем составе непрерывный. По этому каналу дискретные сигналы проходят как последовательность импульсов, комбинация частот, т.е. эти сигналы в непрерывном канале ведут себя как непрерывные. С другой стороны, по дискретному каналу с помощью цифровых методов можно передавать и непрерывные сигналы. В этом проявление единства непрерывных и дискретных сигналов, непрерывных и дискретных каналов.

При анализе каналов следует уметь определить границу между дискретным и непрерывным каналами, уметь находить дискретный модулятор и дискретный демодулятор, наличие которых придает каналу свойство дискретности. Например, рельсовая цепь (РЦ), как дискретный по состоянию канал, является таковым потому, что дискретным модулятором на входе канала является колесная пара вступающего на РЦ поезда. Дискретным демодулятором на выходе РЦ служит путевое реле, которое находится под током при отсутствии поезда и обесточивается при вступлении поезда на РЦ.

### ***Представление информации в живых организмах***

Человек воспринимает информацию об окружающем мире с помощью органов чувств (зрения, слуха, обоняния, осязания и вкуса). Чувствительные нервные окончания органов чувств (рецепторы) воспринимают воздействие (например, на глазном дне колбочки и палочки реагируют на воздействие световых лучей) и передают его нейронам (нервным клеткам), цепи которых составляют нервную систему.

Нейрон может находиться в одном из двух состояний: невозбужденном и возбужденном. Возбужденный нейрон генерирует электрический импульс, который передается по нервной системе.

Состояния нейрона (нет импульса, есть импульс) можно рассматривать как знаки некоторого алфавита нервной системы, с помощью которого происходит передача информации.

Генетическая информация во многом определяет строение и развитие живых организмов и передается по наследству.

Хранится генетическая информация в клетках организмов в структуре молекул ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) – рисунке 6. Молекула ДНК состоит из двух скрученных друг с другом в спираль цепей, построенных из четырех нуклеотидов: А, G, Т и С, которые образуют генетический алфавит.

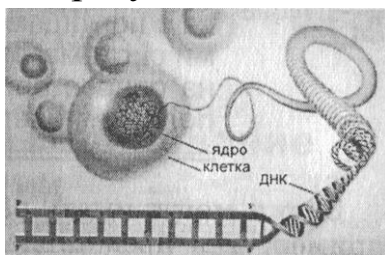


Рисунок 7. Молекула ДНК

Молекула ДНК человека включает в себя около 3 миллиардов пар нуклеотидов и поэтому в ней закодирована вся информация об организме человека: его внешность, здоровье или предрасположенность к болезням, способности и пр.

*В живых организмах информация передается и хранится с помощью объектов различной физической природы (состояния нейрона, нуклеотиды в молекуле ДНК), которые могут рассматриваться как знаки биологических алфавитов.*

Представление информации происходит в различных формах в процессе восприятия окружающей среды живыми организмами и человеком, в процессах обмена информацией между человеком и человеком, человеком и компьютером, компьютером и компьютером и так далее. Преобразование информации из одной формы представления (знаковой системы) в другую называется *кодированием*.

Средством кодирования служит таблица соответствия знаковых систем, которая устанавливает взаимно однозначное соответствие между знаками или группами знаков двух различных знаковых систем. В дальнейшем будет приведена такая таблица, которая устанавливает соответствие между

графическими изображениями знаков алфавита и их компьютерными кодами.

В процессе обмена информацией часто приходится производить операции *кодирования* и *декодирования* информации. При вводе знака алфавита в компьютер путем нажатия соответствующей клавиши на клавиатуре происходит кодирование знака, то есть преобразование его в компьютерный код. При выводе знака на экран монитора или принтер происходит обратный процесс - декодирование, когда из компьютерного кода знак преобразуется в его графическое изображение.

**Кодирование** - это операция преобразования знаков или групп знаков одной знаковой системы в знаки или группы знаков другой знаковой системы.

Рассмотрим в качестве примера кодирования соответствие цифрового и штрихового кодов товара. Такие коды имеются на каждом товаре и позволяют полностью идентифицировать товар (страну и фирму производителя, тип товара и др.).

Знакам цифрового кода (цифрам) соответствуют группы знаков штрихового кода (узкие и широкие штрихи, а также размеры промежутков между ними) – рисунок 7. Для человека удобен цифровой код, а для автоматизированного учета - штриховой код, который считывается с помощью узкого светового луча и подвергается последующей обработке в компьютерных бухгалтерских системах учета.



Рисунок 8 Цифровой и штриховой коды товара

### **Двоичное кодирование информации в компьютере**

В компьютере для представления информации используется двоичное кодирование, так как удалось создать надежно

работающие технические устройства, которые могут со стопроцентной надежностью сохранять и распознавать не более двух различных состояний (цифр):

- электромагнитные реле (замкнуто/разомкнуто), широко использовались в конструкциях первых ЭВМ;
- участок поверхности магнитного носителя информации (намагничен/размагничен);
- участок поверхности лазерного диска (отражает/не отражает);
- триггер, может устойчиво находиться в одном из двух состояний, широко используется в оперативной памяти компьютера.

Все виды информации в компьютере кодируются на машинном языке, в виде логических последовательностей нулей и единиц – рисунок 9.

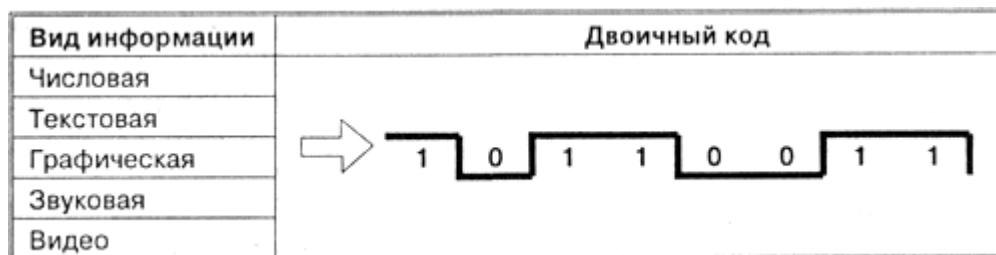


Рисунок 9. Двоичное кодирование информации

*Информация в компьютере представлена в двоичном коде, алфавит которого состоит из двух цифр (0 и 1).*

Цифры двоичного кода можно рассматривать как два равновероятных состояния (события). При записи двоичной цифры реализуется выбор одного из двух возможных состояний (одной из двух цифр) и, следовательно, она несет количество информации, равное 1 биту.

Даже сама единица измерения количества информации бит (bit) получила свое название от английского словосочетания Binary digit (двоичная цифра).

Важно, что каждая цифра машинного двоичного кода несет информацию в 1 бит. Таким образом, две цифры несут информацию в 2 бита, три цифры - в 3 бита и так далее.



Количество информации в битах равно количеству цифр двоичного машинного кода.

*Каждая цифра машинного двоичного кода несет количество информации, равное одному биту.*

**Принцип кодирования генетической информации** заключается в том, что порядок расположения аминокислот в белке закодирован в порядке расположения кодонов (триплетов нуклеотидов) в ДНК гена, т.е. структура гена и структура кодируемого им белка коллинеарны.

Свойства генетического кода:

1. Код является триплетным. Триплет - последовательность трех нуклеотидов, кодирующая одну аминокислоту.
2. Код является непрерывным. Каждый триплет соседствует со следующим без промежутков.
3. Код является неперекрывающимся. Процесс считывания генетической информации не допускает возможности перекрывания кодонов.
4. Код является вырожденным (избыточным), т.е. одна аминокислота может кодироваться различными триплетами нуклеотидов (исключение составляют метионин и триптофан, которые кодируются только одним триплетом). Аминокислот - 20. Различных триплетов нуклеотидов -  $4^3=64$ . Три триплета УАА, УАГ, УГА - это стоп-сигналы(терминирующие кодоны), прекращающие синтез белка.

Триплет, соответствующий метионину (АУГ), выполняет функцию инициирования (возбуждения) считывания и не кодирует аминокислоту, если стоит в начале цепи ДНК.

5. Код является коллинеарным. Очерёдность триплетов нуклеотидов ДНК соответствует очерёдности аминокислот в белке.
6. Код является универсальным, т.к. он одинаков для всех живых организмов.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Изучите теоретический материал.

2. Получите у преподавателя биомедицинский сигнал в цифровом виде (ЭКГ, ЭЦФГ или ФПГ)
3. Выполните его кодирование путем: оконной свертки, бинарного кодирования, кодирования в троичной системе счисления, в логической метрике превышения определенного порога, в шестнадцатиричном алфавите.
4. Сравните графическое представление кодированных сигналов в различной форме.
5. Осуществите сжатие и восстановление информации различными типами кодирования. Сравните результаты.
6. Оформите отчет, включающий: результаты выполнения работы, выводы, краткие ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы.**

1. Для чего осуществляется кодирование биомедицинских сигналов?
2. В чем особенность сжатия информации как разновидности кодирования?
3. О чем говорит теорема Котельникова? Ее роль в кибернетике.
4. Что такое квантование?
5. Что означает частота дискретизации?
6. Как оценить информационные потери при кодировании сигнала?
7. Для чего нужна цифровая обработка сигнала?
8. Для чего предназначены АЦП и ЦАП? Их основные характеристики.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12. ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ (ПАКЕТЫ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ)**

**Цель работы:** изучение архитектуры искусственных нейронных сетей, способов их графического изображения в виде функциональных и структурных схем и программного представления в виде объектов специального класса `network`, включающих массив структур с атрибутами сети и набор необходимых методов для создания, инициализации, обучения, моделирования и визуализации сети, а также приобретение навыков построения сетей различной архитектуры с помощью инструментального программного пакета `Neural Network Toolbox` системы `MATLAB`.

### **Краткие теоретические сведения.**

Искусственные нейронные сети основаны на весьма простой биологической модели нервной системы, состоящей из огромного числа ( $10^{11}$ ) нейронов, каждый из которых принимает взвешенную сумму входных сигналов и при определенных условиях передает сигнал другим нейронам. Количество связей нейронов в системе достигает  $10^{15}$ .

Теория нейронных сетей возникла из исследований в области искусственного интеллекта и связана с попытками воспроизведения способности нервных биологических систем обучаться и исправлять ошибки, моделируя низкоуровневую структуру мозга. Исследования по созданию таких систем на основе высокоуровневого (символьного) моделирования процесса мышления не принесли желаемых результатов. Эта теория развивалась в течение последних шести десятилетий и за последние двадцать лет нашла широкое практическое применение: в космонавтике и авиации – для имитации траекторий полета и построения систем автоматического пилотирования; в военном деле – для управления оружием и слежением за целями; в электронике – для разработки систем машинного зрения и синтеза речи; в медицине – для диагностики заболеваний и конструирования протезов; в производстве – для

управления технологическими процессами, роботами и т. д. Такой успех нейронных сетей объясняется тем, что была создана необходимая элементная база для реализации нейронных сетей, а также разработаны мощные инструментальные средства для их моделирования в виде пакетов прикладных программ. К числу подобных пакетов относится пакет Neural Networks Toolbox (NNT) системы математического моделирования MATLAB 6 фирмы Math Works.

Пакет прикладных программ NNT содержит средства для построения нейронных сетей, базирующихся на поведении математического аналога нейрона. Пакет обеспечивает эффективную поддержку проектирования, обучения, анализа и моделирования множества известных типов сетей – от базовых моделей персептрона до самых современных ассоциативных и самоорганизующихся сетей. В пакете имеется более 15 таких типов. Для каждого типа архитектуры и обучающих правил имеются М-функции инициализации, обучения, адаптации, создания, моделирования, отображения, оценки и демонстрации, а также примеры применения. Обеспечена возможность генерации переносимого кода с помощью пакета Real Time Workshop, также входящего в систему MATLAB 6.

### *Модели искусственного нейрона*

Элементарной ячейкой нейронной сети является нейрон. Структура нейрона с единственным скалярным входом показана на рис. 1,а.

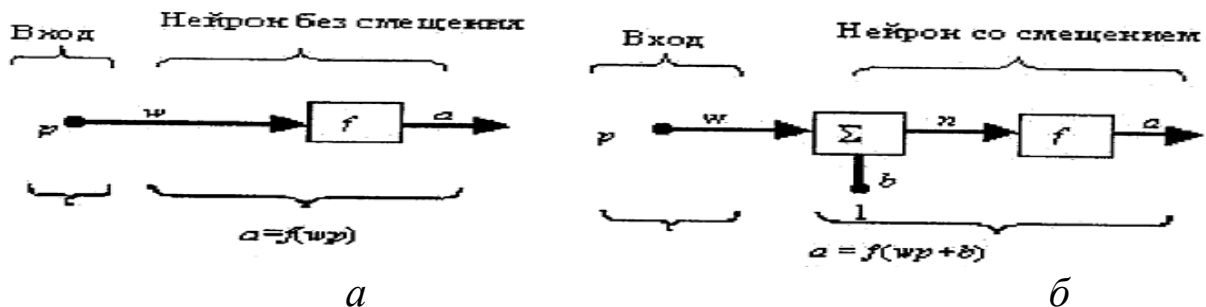


Рис. 1. Простой нейрон

Скалярный входной сигнал  $p$  умножается на скалярный весовой коэффициент  $w$ , и результирующий взвешенный вход

$w * p$  является аргументом функции активации нейрона, которая порождает скалярный выход  $a$ .

Нейрон, показанный на рис. 1,б, дополнен скалярным смещением  $b$ . Смещение суммируется со взвешенным входом  $w * p$  и приводит к сдвигу аргумента функции на величину  $b$ . Действие смещения можно свести к схеме взвешивания, если представить что нейрон имеет второй входной сигнал со значением, равным  $1$ . Вход  $n$  функции активации нейрона по-прежнему остается скалярным и равным сумме взвешенного входа и смещения  $b$ . Эта сумма является аргументом функции активации  $f$ ; выходом функции активации является сигнал  $a$ . Константы  $w$  и  $b$  являются скалярными параметрами нейрона. Основным принцип работы нейронной сети состоит в настройке параметров нейрона с тем, чтобы функционирование сети соответствовало некоторому желаемому поведению. Регулируя веса или параметры смещения, можно “научить” сеть выполнять конкретную работу; возможно также, что сеть сама будет корректировать свои параметры, чтобы достичь требуемого результата.

Уравнение нейрона со смещением имеет вид

$$a = f(w * p + b * 1).$$

Как уже отмечалось, смещение  $b$  – настраиваемый скалярный параметр нейрона, который не является входом, а константа  $1$ , которая управляет смещением, рассматривается как вход и может быть учтена в виде линейной комбинации векторов входа

$$a = [w \quad b] \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix}.$$

### Функция активации

Функции активации (передаточные функции) нейрона могут иметь самый разнообразный вид. Функция активации  $f$ , как правило, принадлежит классу сигмоидальных функций с аргументом  $n$  и выходом  $a$ .

Ниже рассмотрены три наиболее распространенные функции активации.

Единичная функция активации с жестким ограничением **hardlim**. Эта функция описывается соотношением  $a = \text{hardlim}(n) = 1(n)$  и показана на рис. 2. Она равна 0, если  $n < 0$ , и 1, если  $n \geq 0$ .

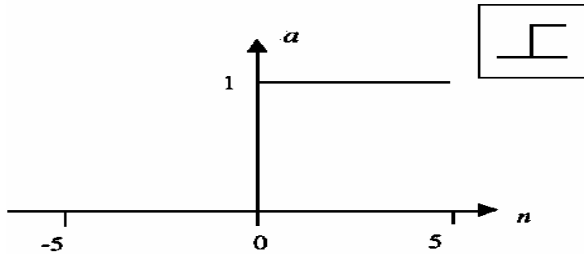


Рис. 2. Функция активации **hardlim**

В состав пакета ППП Neural Network Toolbox входит М-функция **hardlim**, реализующая функцию активации с жесткими ограничениями.

Линейная функция активации **purelin**. Эта функция описывается соотношением  $a = \text{purelin}(n) = n$  и показана на рис. 3.

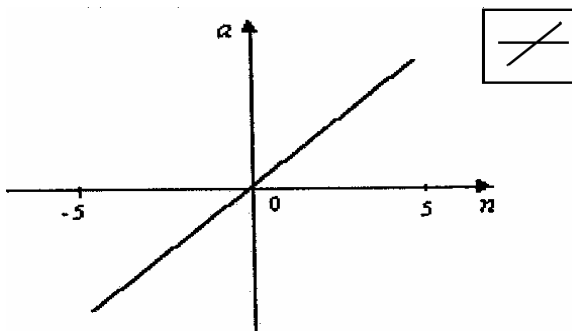


Рис. 3. Линейная функция активации **purelin**

Логистическая функция активации **logsig**. Эта функция описывается соотношением  $a = \text{logsig}(n) = 1/(1 + \exp(-n))$  и показана на рис. 4. Она принадлежит к классу сигмоидальных функций, и ее аргумент может принимать любое значение в диапазоне от  $-\infty$  до  $+\infty$ , а выход изменяется в диапазоне от 0 до 1. В пакете ППП Neural Network Toolbox она представлена М-функцией **logsig**. Благодаря свойству дифференцируемости эта функция часто используется в сетях с обучением на основе метода обратного распространения ошибки.

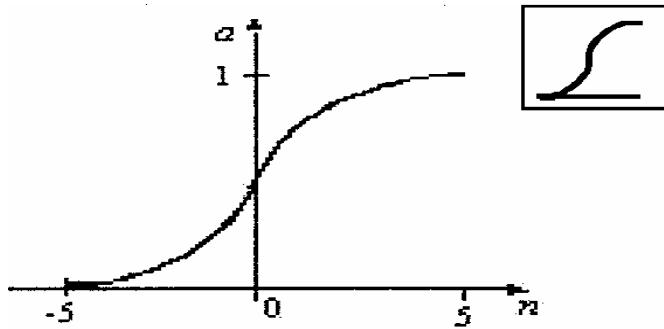


Рис. 4. Функция logsig

Символ в квадрате в правом верхнем углу графика характеризует функцию активации. Это изображение используется на структурных схемах нейронных сетей.

В пакет ППП Neural Network Toolbox включены и другие функции активации. Используя язык MATLAB, пользователь может создавать и свои собственные уникальные функции.

### Нейрон с векторным входом

Нейрон с одним вектором входа  $p$  с  $R$  элементами показан на рис. 5. Здесь каждый элемент входа умножается на веса соответственно и взвешенные значения передаются на сумматор. Их сумма равна скалярному произведению вектора-строки  $W$  на вектор входа  $p$ .

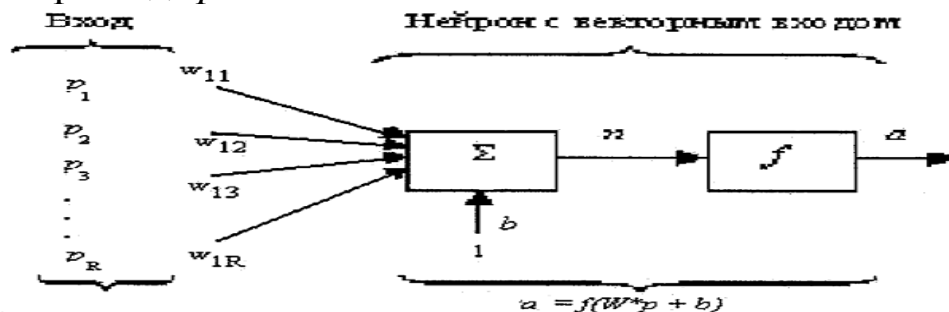


Рис. 5. Функциональная схема нейрона

Нейрон имеет смещение  $b$ , которое суммируется со взвешенной суммой входов. Результирующая сумма  $n$  определяется как

$$n = w_{11}p_1 + w_{12}p_2 + \dots + w_{1R}p_R + b$$

и служит аргументом функции активации  $f$ . В нотации языка MATLAB это выражение записывается так:

$$\mathbf{n} = \mathbf{W} * \mathbf{p} + \mathbf{b}.$$

Структура нейрона, показанная на рис. 5, содержит много лишних деталей. При рассмотрении сетей, состоящих из большого числа нейронов, будет использоваться укрупненная структурная схема нейрона (рис. 6).

Вход нейрона изображается в виде темной вертикальной черты, под которой указывается количество элементов входа  $R$ . Размер вектора входа  $p$  указывается ниже символа  $p$  и равен  $R \times 1$ . Вектор входа умножается на вектор-строку  $W$  длины  $R$ . Как и прежде, константа  $1$  рассматривается как вход, который умножается на скалярное смещение  $b$ . Входом  $n$  функции активации нейрона служит сумма смещения  $b$  и произведения  $W * p$ . Эта сумма преобразуется функцией активации  $f$ , на выходе которой получается выходная величина нейрона  $a$ , которая в данном случае является скалярной величиной. Структурная схема, приведенная на рис. 6, называется слоем сети. Слой характеризуется матрицей весов  $W$ , смещением  $b$ , операциями умножения  $W * p$ , суммирования и функцией активации  $f$ . Вектор входов  $p$  обычно не включается в характеристики слоя.

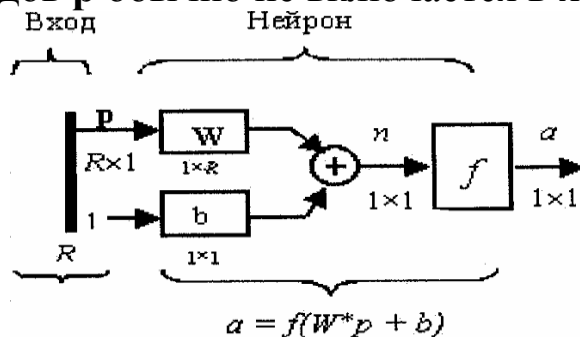


Рис. 6. Структурная схема нейрона

Каждый раз, когда используется сокращенное обозначение сети, размерность матриц указывается под именами векторно-матричных переменных. Эта система обозначений поясняет строение сети и связанную с ней матричную математику.

На укрупненной структурной схеме для обозначения типа функции активации применяются специальные графические символы; некоторые из них приведены на рис. 7, где  $a$  – ступенчатая;  $b$  – линейная;  $v$  – логистическая функция.



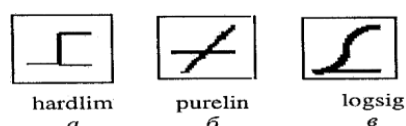


Рисунок 7. Функции активации

### *Искусственные нейронные сети*

Хотя отдельные нейроны и способны после некоторой процедуры обучения решать ряд задач искусственного интеллекта, все же для эффективного решения сложных задач по распознаванию образов, идентификации и классификации объектов, распознаванию и синтезу речи, оптимальному управлению применяют достаточно большие группы нейронов, образуя из них искусственные нейронные сети в виде связанных между собой слоёв, напоминающие биологические нейронные (нервные) сети человека и животных.

Существует множество способов организации искусственных нейронных сетей, которые могут содержать различное число слоёв нейронов. Нейроны могут быть связаны между собой как внутри отдельных слоёв, так и между слоями. В зависимости от направления передачи сигнала эти связи могут быть прямыми или обратными. Слой нейронов, непосредственно принимающий информацию из внешней среды, называется входным слоем, а слой, передающий информацию во внешнюю среду, – выходным слоем. Остальные слои, если они имеются в сети, называются промежуточными, или скрытыми. В ряде случаев такого функционального распределения слоёв сети не производится, так что входы и выходы могут присоединяться к любым слоям и иметь произвольное число компонент.

Структура, или архитектура сети искусственных нейронов зависит от той конкретной задачи, которую должна решать сеть. Она может быть однослойной без обратных связей или с обратными связями, двухслойной с прямыми связями, трехслойной с обратными связями и т. д. Сети с обратными связями называют часто рекуррентными.

Описание архитектуры искусственной нейронной сети помимо указания числа слоёв и связей между ними должно

включать сведения о количестве нейронов в каждом слое, виде функций активации в каждом слое, наличии смещений для каждого слоя, наличии компонент входных, выходных и целевых векторов, а в ряде случаев и характеристики топологии слоёв. Например, для аппроксимации любой функции с конечным числом точек разрыва широко используется сеть с прямой передачей сигналов. В этой сети имеется несколько слоёв с сигмоидальными функциями активации. Выходной слой содержит нейроны с линейными функциями активации. Данная сеть не имеет обратных связей, поэтому её называют сетью с прямой передачей сигналов (FF-net).

Графически искусственная нейронная сеть изображается в виде функциональной или структурной схемы. На функциональной схеме сети с помощью геометрических фигур изображаются её функциональные блоки, а стрелками показываются входы, выходы и связи. В блоках и на стрелках указываются необходимые обозначения и параметры.

Структурная схема сети изображается с помощью типового набора блоков, соединительных элементов и обозначений, принятых в инструментальном программном пакете Neural Network Toolbox системы MATLAB и пакете имитационного моделирования Simulink той же системы. Структурная схема сети может быть укрупнённой или детальной, причём степень детализации определяется пользователем. Системы обозначений блоков, элементов и параметров сети является векторно-матричной, принятой в системе MATLAB. Если в обозначении используется два индекса, то, как правило, первый индекс (индекс строки) указывает адресата, или пункт назначения, а второй индекс (индекс столбца) – источник структурной схемы сети. Структурные схемы создаются системой автоматически с помощью команды gensim. Если элементом вектора или матрицы на структурной схеме является сложный объект, то используются соответственно ячейка и массив ячеек.

Программным представлением, или вычислительной моделью искусственной нейронной сети, является объект специального класса network, который включает массив структур

с атрибутами сети и набор методов, необходимых для создания сети, а также для её инициализации, обучения, моделирования и визуализации. Класс `Network` имеет два общих конструктора, один из которых не имеет параметров и обеспечивает создание массива структур с нулевыми значениями полей, а второй – имеет минимальный набор параметров для создания модели нейронной сети, достраиваемой затем до нужной конфигурации с помощью операторов присваивания. Для создания нейронных сетей определённого вида используются специальные конструкторы.

### **Практическая часть:**

Создайте вычислительную модель нейронной сети с двумя выходами, тремя слоями и одним целевым входом, используя общий конструктор сети с параметрами

*`Net = network (numInputs, numLayers, biasConnect, inputConnect, layerConnect, outputConnect, targetConnect).`*

Связи между слоями должны быть только прямыми, входы необходимо соединить с первым слоем, а выход – с последним. Выход должен быть целевым, первый слой должен иметь смещения.

Смысл и значения параметров конструктора для создания модели сети заданной архитектуры таковы:

*`numInputs=2` – количество входов сети;*

*`numLayers=3` – количество слоёв в сети;*

*`biasConnect=[1; 0; 0]` – матрица связности для смещений размера `numLayers * 1`;*

*`inputConnect=[1 1; 0 0; 0 0]` – матрица связности для входов размера `numLayers * numInputs`;*

*`layerConnect=[0 0 0; 1 0 0 0; 0 1 0]` – матрица связности для слоёв размера `numLayers * numLayers`;*

*`outputConnect=[0 0 1]` – матрица связности для выходов размера `1 * numLayers`;*

*`targetConnect=[0 0 1]` – матрица связности для целей размера `1 * numLayers`.*

Порядок выполнения заданий следующий:

1. Создать шаблон сети, выполнив команду

*net = network (2, 3, [1; 0; 0], [1 1; 0 0; 0 0], ..., ,  
[0 0 0; 1 0 0; 0 1 0], [0 0 1])*

2. Проверить значения полей вычислительной модели нейронной сети *net* и их соответствие заданным значениям в списке параметров.

3. Проверить значения вычисляемых полей модели, которые дополняют описание архитектуры сети

*numOutputs = 1 – количество выходов сети;*

*numTargets = 1 – количество целей сети;*

*numInputDelays = 0 – максимальное значение задержки для входов сети.*

*numLayersDelays = 0 – максимальное значение задержки для слоёв сети.*

Заметим, что каждый выход и каждая цель присоединяются к одному или нескольким слоям при этом количество компонент выхода или цели равно количеству нейронов в соответствующем слое. Для увеличения возможности модели в сеть включают линии задержки либо на её входах, либо между слоями. Каждая линия задерживает сигнал на один такт. Параметры **numInputDelays** и **NumLayerDelays** определяют максимальное число линий для какого-либо входа или слоя соответственно.

4. Проанализировать структурную схему построенной сети, выполнив команду **gensim(net)** и детализируя блоки с помощью двойного щелчка левой клавиши мыши по рассматриваемому блоку. На структурных схемах искусственных нейронных сетей в пакете **NNT** используются следующие обозначения:

а) **Neural Network** – искусственная нейронная сеть с обозначениями входов **p{1}**, **p{2}**, ... и выхода **y{1}**;

б) входы **Input1**, или **p{1}** и **Input2**, или **p{2}**;

в) дисплей **y{1}**;

г) **Layer 1**, **Layer 2**, **Layer 3**, ... слои нейронов с обозначениями входов **p{1}**, **p{2}**, **a{1}**, **a{2}**, ... и выходов **a{1}**, **a{2}**, **a{3}**, ..., **y{1}**;

д) **TDL** – линии задержки (**Time Delay**) с именами **Delays1**, **Delays2**, ..., которые обеспечивают задержку входных сигналов или сигналов между слоями нейронов на **1, 2, 3, ...** такта;

е) **Weights** – весовая матрица для входных сигналов или сигналов между слоями нейронов; размер матрицы весов для каждого вектора входа **S.R**, где **S** – число нейронов входного слоя, а **R** – число компонент вектора входа, умноженное на число задержек; размер матрицы для сигналов от слоя **j** к слою **i** равен **S.R**, где **S** – число нейронов в слое **i**, а **R** – число нейронов в слое **j**, умноженное на число задержек;

ж) **dotprod** – блок взвешивания входных сигналов и сигналов между слоями, на выходе которого получается сумма взвешенных, т. е. умноженных на соответствующие веса компонент сигнала;

з) **mux** – концентратор входных сигналов и сигналов между слоями, преобразует набор скалярных сигналов в вектор, а набор векторов в один вектор суммарной длины;

и) **netsum** – блок суммирования компонент для каждого нейрона слоя: компонент от нескольких векторов входа с учётом задержек, смещения и т. п.;

к) **hardlim, purelin** и т. д. – блоки функций активации;

л) **pd{1, 1}, pd{1, 2}, ad{2, 1}, ...** – сигналы после линий задержки (**d - delay**);

м) **iz{1, 1}, iz{1, 2}, lz{2, 1}, lz{3, 2}** – вектор-сигналы с выхода концентратора;

н) **bias** – блок весов смещений для слоя нейронов;

о) **IW** – массив ячеек с матрицами весов входов: **IW{i, j}** – матрицы для слоя **i** от входного вектора **j**;

п) **LW** – массив ячеек с матрицами весов для слоёв: **LW{i, j}** – матрицы для слоя **i** от слоя **j**.

5. Проанализировать все параметры каждого блока структурной схемы рассматриваемой нейронной сети и в случае необходимости обратиться к справочной системе пакета NNT.

6. Задать нулевые последовательности сигналов для входов

$$P = [0 \ 0 ; 0 \ 0]$$

и произвести моделирование сети

$$A = \text{sim}(\text{net}, P).$$

7. Задать диапазоны входных сигналов и весовые матрицы с помощью следующих присваиваний:

```

net.inputs{1}.range = [0 1];
net.inputs{2}.range = [0 1];
net.b{1} = - 1/4;
net.IW{1, 1} = [0.5];
net.IW{1, 2} = [0.5];
net.LW{2, 1} = [0.5];
net.LW{3, 2} = [0.5].

```

Исполнить команду **gensim(net)** и проверить параметры блока.

8. Вывести на экран поля вычислительной модели и их содержимое, используя функцию **celldisp**. Убедиться в правильности значений полей модели.

9. Промоделировать созданную статическую сеть, т. е. сеть без линий задержки, используя групповое и последовательное представление входных сигналов

```

PG = [0.5 1 ; 1 0.5];
PS = {[0.5 1] [1 0.5]};
AG = sim(net, PG);
AS = sim(net, PS).

```

Убедиться, что для статической сети групповое и последовательное представления входных сигналов дают один и тот же результат.

10. Дополнить архитектуру созданной нейронной сети линиями задержки для входных сигналов и для сигналов между 2-м и 3-м слоями, превратив таким образом статическую сеть в динамическую:

```

net.inputWeights{1, 1}.delays = [0 1];
net.inputWeights{1, 2}.delays = [0 1];
net.layerWeights{3, 2}.delays = [0 1 2].

```

Построить структурную схему динамической сети и выяснить смысл используемых операторов присваивания.

11. Скорректировать весовые матрицы:

```

net.IW{1, 1} = [0.5 0.5];
net.IW{1, 2} = [0.5 0.25];
net.LW{3, 2} = [0.5 0.25 1].

```

12. Промоделировать динамическую сеть, используя групповое и последовательное представление входных сигналов:

$$AG = \text{sim}(\text{net}, PG);$$

$$AS = \text{sim}(\text{net}, PS).$$

Убедиться, что групповое представление входных сигналов искажает результат, так как в этом случае работа одной сети заменяется параллельной работой двух (по числу последовательностей) одинаковых сетей с нулевыми начальными значениями сигналов на выходах линий задержки.

1. Вывести на печать поля вычислительной модели и их содержимое, используя функцию **celldisp**.

2. Сохранить содержимое командного окна в М-файле для последующего использования.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что является элементарной ячейкой нейронной сети?
  - А) нейрон
  - Б) нефрон
  - В) нервное волокно
  - Г) нервный пучок
  
2. Теория нейронных сетей возникла из исследований в области:
  - А) искусственного интеллекта
  - Б) биологических процессов
  - В) физиологических процессов организма
  - Г) физических явлений
  
3. Какое практическое применение нашла теория нейронных сетей в медицине?
  - А) диагностика заболеваний и конструирование протезов**
  - Б) диагностика заболеваний и физиотерапия
  - В) физиотерапия и обеспечение хирургических операций
  - Г) конструирование протезов и обеспечение хирургических операций

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №13. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОРТАЛОВ, ПОСВЯЩЕННЫХ СИСТЕМАМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ**

**Цель:** провести сравнительный анализ медицинских САУ, выделить недостатки и подчеркнуть достоинства.

### **Краткие теоретические сведения**

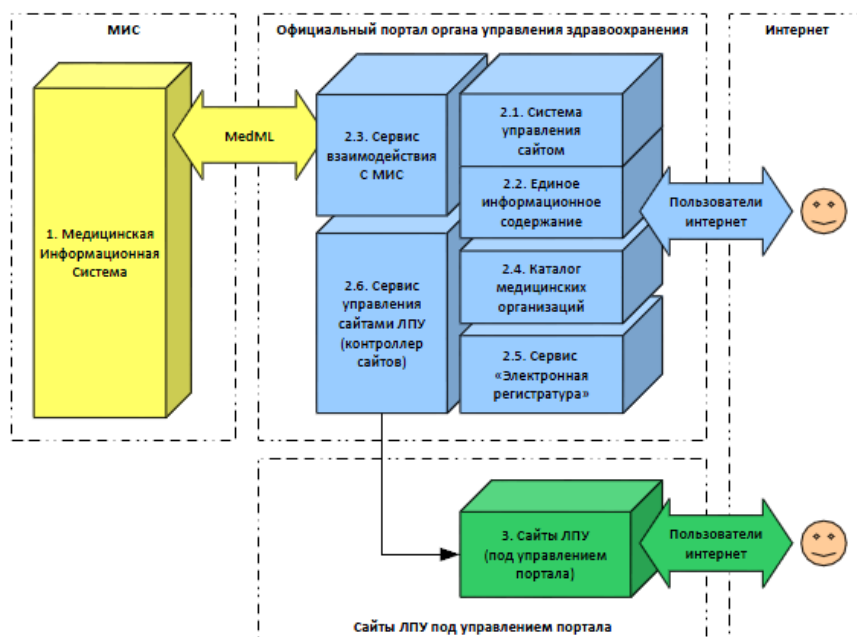
#### **Цели и задачи медицинского портала:**

- Построение единой базы данных по всем медицинским учреждениям, включая интеграцию с медицинскими информационными системами (МИС)
- Обеспечение для пациентов доступа к информации о правах пациента, порядке оказания медицинской помощи, информация о клинике, услугах, специалистах и ценах, онлайн-запись на прием, и многое другое
- Обеспечение качественной обратной связи с пациентами (сервис «обращения/ вопрос-ответ»)
- Автоматизация процесса записи на прием и управления расписанием врачей
- Обеспечение работы сайта под высокими нагрузками
- Создание мультисайтового проекта: основной сайт и подчиненные сайты медицинских учреждений или филиалов.

#### **Архитектура медицинского портала**

Архитектура портала как основного компонента комплексной веб-системы региона представлена на следующем рисунке:

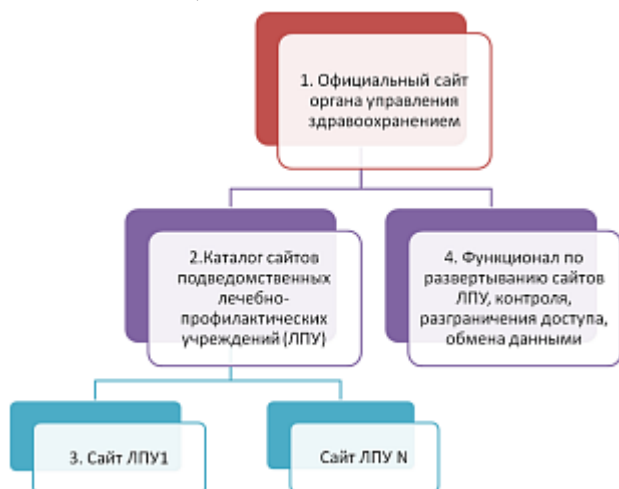




На рисунке синим изображены составляющие решения «1С-Битрикс: Медицинский портал», желтым и зеленым - внешние по отношению к portalу подсистемы.

### Сайты лечебно-профилактических учреждений

Концепция комплексной веб-системы здравоохранения предусматривает наличие центрального портала региона, а также сети сайтов подведомственных учреждений (ЛПУ). Согласно данной концепции портал обеспечивает возможность автоматизированного развертывания сайтов подведомственных ЛПУ. Общая логическая схема выглядит следующим образом:



Портал содержит каталог, в который могут быть включены все лечебно-профилактические учреждения и другие медицинские организации региона (государственные и коммерческие). В этом случае каталог сам по себе представляет большую ценность для населения, как источник актуальной информации об организациях

Каталог учреждений реализован с помощью модуля информационные блоки, имеет рубрикатор учреждений с произвольной глубиной вложенности и возможность неограниченного количества атрибутов для описания каждой медицинской организации.

Базовые атрибуты организации (есть в типовой поставке):

- наименование организации
- адрес
- контактные телефоны
- контактный e-mail
- адрес сайта (URL)
- флаг участия в электронной регистратуре
- подробное описание

### **Сайты подведомственных ЛПУ**

Предоставить каждому ЛПУ возможность создавать себе сайт - означает потерять управление, получить множество сайтов на различных технологиях, с разными принципами подачи информации. Наиболее эффективно - централизованно предоставлять всем ЛПУ сайт на единой платформе с единой системой управления, системой разграничения прав доступа и обеспечению безопасности и централизованным хранилищем данных.

В таком случае центральный орган управления здравоохранением получит возможность контроля над любым сайтом ЛПУ, централизованное обновление и изменение информации на подчиненных сайтах, сбор необходимой информации со всей сети сайтов.

**Можно выделить два способа развертывания и лицензирования подчиненных сайтов:**

**Самостоятельные сайты ЛПУ**, размещенные на хостинге в сети Интернет и подключенные к portalу для управления. Преимущества такого способа: полная изолированность и индивидуальность сайтов ЛПУ, сайты ЛПУ могут размещаться на разных хостингах

Из недостатков можно отметить сравнительно высокую стоимость, т.к. на каждый сайт требуется отдельная лицензия.

**Сайты ЛПУ, размещенные на единой системе управления сайтом.** В этом случае все сайты будут иметь общую базу данных (отдельно от базы данных portalа) и разделять ее между собой на базе прав доступа к контенту. Снаружи каждый сайт будет иметь собственное доменное имя (2-го или 3-го уровня), собственный шаблон дизайна, собственную структуру сайта - то есть для посетителя внутренняя архитектура остается прозрачной. Преимущества такого способа: простота развертывания каждого сайта (не нужен отдельный хостинг, не нужно с нуля разворачивать решение для каждого ЛПУ), низкая стоимость.




#### **Управление сайтами ЛПУ (контроллер сайтов)**


Подробная информация о функционале модуля "Контроллер сайтов" представлена в соответствующем разделе. Для обеспечения централизованного управления все сайты подключаются в контроллер сайтов. Для второго способа (см. выше) в контроллер подключается вся многосайтовая конфигурация 1С-Битрикс: Сайт медицинской организации (Базовый).

**Контроллер обеспечивает:** единую систему управления сайтами ЛПУ — управление контентом, правами доступа и пользователями на сайтах ЛПУ, выгрузка общих новостных материалов из portalа на сайты ЛПУ, подключение неограниченного числа сайтов ЛПУ для управления, для каждого сайта могут быть установлены индивидуальные права доступа для управления информацией, позволяет выполнять управление любым подчиненным сайтом ЛПУ без дополнительной

авторизации (при наличии авторизации с соответствующими правам на портале).

### Сравнительная характеристика порталов, связанных с САУ в медицине

Наименование	Год создания	Краткая характеристика	Страна создания	Портал	
<a href="#">1С</a>	1991	Фирма «1С» специализируется на разработке, дистрибуции, издании и поддержке компьютерных программ делового и домашнего назначения. Комплексная автоматизация учреждений достигается использованием продуктов «1С:Медицина. Больница», «1С:Медицина. Поликлиника», «1С:Медицина. Больничная аптека», «1С:Медицина. Клиническая лаборатория» и др.	Россия	1с.ru	
<a href="#">Siemens Healthcare</a>	1896	Компания «Сименс», один из крупнейших в мире поставщиков энергоэффективных и экономящих ресурсы технологий, является главным разработчиком ветровых установок для других стран, ведущим поставщиком парогазовых турбин для выработки электроэнергии, лидером в поставке решений для передачи электроэнергии и первопроходцем в области инфраструктурных решений, средств автоматизации и программного обеспечения для промышленности. Кроме того, компания является ведущим поставщиком медицинского визуализационного оборудования (например, компьютерных и магнитно-резонансных томографов) и лидером в лабораторной диагностике и ИТ-решениях для лечебных учреждений.	Германия	<a href="http://www.siemens.ru">www.siemens.ru</a>	
Алтэй	1996	Флагманским продуктом ООО «Группа АЛТЭЙ» является Лабораторная информационная система АЛТЭЙ, в которой многолетний опыт в области автоматизации лабораторий реализован в новом качестве на передовых средствах разработки. Лабораторная информационная система (ЛИС) АЛТЭЙ предназначена для автоматизации технологического процесса и учета	Россия	<a href="http://www.altey.ru">www.altey.ru</a>	

		в лаборатории, включая штриховое кодирование образцов, автоматизацию хранения образцов, обмен информацией с анализаторами, внутрилабораторный контроль качества.			
Витакор	2004	<p>ЗАО «Витакор» — авторитетная российская компания, с 2004 года осуществляющая широкий спектр услуг по информатизации регионального здравоохранения. Компания является лидером в разработке и внедрении информационных систем для фондов обязательного медицинского страхования и страховых медицинских компаний, а также медицинских организаций любой формы собственности.</p>	Россия	<a href="http://www.vitacore.ru">www.vitacore.ru</a>	

### Индивидуальное задание

Сравните указанные системы автоматизированного управления и сделайте вывод о приоритетности одной из указанных над другой (если это будет целесообразно).

№ варианта	Сравниваемые САУ
1	Нетрика, ООО и Flipbox
2	Polymedia и <a href="#">ВРМ «Робомед»</a>
3	<a href="#">ХОСТ, Группа Компаний</a> и <a href="#">САС Институт, ООО</a>
4	<a href="#">InterSystems</a> и <a href="#">АГФА, ООО</a>
5	<a href="#">Брегис</a> и <a href="#">ИНТЕРИН, группа компаний</a>
6	Нетрика, ООО и <a href="#">Комплексные медицинские информационные системы, ООО</a>
7	<a href="#">Лаборатория «Акросс-Инжиниринг», ООО</a> и Polymedia
8	<a href="#">Мастер Лаб, ООО</a> и <a href="#">Мик-Информ, НТЦ</a>
9	<a href="#">Медицинские Информационные Технологии</a> и <a href="#">САМСОН Групп, ООО</a>
10	<a href="#">Комплексные медицинские информационные системы, ООО</a> и <a href="#">Лаборатория «Акросс-Инжиниринг», ООО</a>
11	<a href="#">ИНТЕРИН, группа компаний</a> и <a href="#">Мастер Лаб, ООО</a>
12	<a href="#">АГФА, ООО</a> и <a href="#">Брегис</a>
13	<a href="#">Медицинские Информационные Технологии</a> и <a href="#">САМСОН Групп, ООО</a>
14	<a href="#">Smart Delta Systems</a> и <a href="#">СофтТраст, ООО</a>
15	<a href="#">СПАРМ</a> и <a href="#">Мастер ЛАБ, ООО</a>

16	<a href="#">СофтТраст, ООО</a> и <a href="#">СП.АРМ</a>
17	<a href="#">Smart Delta Systems</a> и Брегис
18	ФОРС и СП.АРМ
19	АГФА, ООО и Алтэй
20	СофтТранс, ООО и ФОРС

### Контрольные вопросы

1. Что такое портал?
2. Какие задачи преследуют, создавая медицинские порталы?
3. Опишите архитектуру портала медицинского САУ.
4. Какова роль блока «Сервис взаимодействия с МИС»?
5. Для чего используется блок «Сервис управления сайтами ЛПУ (контроллер сайтов)»?

Медицинская Информационная Система (МИС) является:

- а) внутренней системой по отношению к portalу, взаимодействие с которой осуществляется по стандарту [MedML](#);
- б) внешней системой по отношению к portalу, взаимодействие с которой осуществляется по стандарту [MedML](#);
- в) внутренней системой по отношению к portalу, взаимодействие с которой осуществляется по стандарту [Medtime](#);
- г) внешней системой по отношению к portalу, взаимодействие с которой осуществляется по стандарту [Medtime](#).

**7. Одним из преимуществ сайтов ЛПУ, размещенные на единой системе управления сайтом является:**

- а) простота развертывания каждого сайта (не нужен отдельный хостинг, не нужно с нуля разворачивать решение для каждого ЛПУ);
- б) полная изолированность и индивидуальность сайтов ЛПУ;
- в) сайты ЛПУ могут размещаться на разных хостингах.

**8. Контроллер обеспечивает (выберите ответ, содержащий ошибочное утверждение):**

- а) единую систему управления сайтами ЛПУ — управление контентом, правами доступа и пользователями на сайтах ЛПУ;
- б) выгрузку общих новостных материалов из портала на сайты ЛПУ;

- в) подключение ограниченного числа сайтов ЛПУ для управления;
- г) позволяет выполнять управление любым подчиненным сайтом ЛПУ без дополнительной авторизации (при наличии авторизации с соответствующими правам на портале).

## ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕННЫХ ЗНАНИЙ И НАВЫКОВ

1. Два звена с передаточными функциями  $W_1(p)=1/(p+1)$  и  $W_2(p)=1/(p-1)$  соединены последовательно. Результирующая передаточная функция равна?
  1. Два звена с передаточными функциями  $W_1(p)=1/(p+1)$  и  $W_2(p)=1/(p-1)$  соединены параллельно. Результирующая передаточная функция равна?
  2. Два звена с передаточными функциями  $W_1(p)=1/p$  и  $W_2(p)=p$ . Передаточная функция их соединения с обратной отрицательной связью равна ( $W_2$  - в цепи обратной связи)?
  3. Два звена с передаточными функциями  $W_1(p)=1/p$  и  $W_2(p)=p$ . Передаточная функция их соединения с обратной положительной связью равна ( $W_2$  - в цепи обратной связи)?
4. Звено имеет передаточную функцию  $W(p)=1/(1+p^*p^*p^*p)$ . Пересекает ли годограф Михайлова звена точку с координатами  $(-1, j0)$ ?
5. Целевая функция некоторого процесса распределения лекарственных препаратов задана уравнением  $Y=2*x_1+x_2$ . Чему равно ее значение, если известны ограничения:  $x_2-x_1 \leq 1$ ;  $x_2+x_1 \leq 3$ ?
6. Передаточная функция звена равна  $W(p)=1/(p^*p+2^*p+2)$ . Чему равен запас устойчивости по амплитуде?
7. D-область устойчивости системы управления определяется уравнением  $a^*a+b^*b \leq 1$ ;  $a, b$  - целочисленные параметры. Сколько устойчивых состояний имеет система?
8. Передаточная функция определена как  $W(p)=(p^*p-4)/(p^*p-9)$ . Сумма полюсов и корней функции имеет передаточная функция? (Определите значение корней полюсов)?
9. Система управления определяется иерархическим бинарным деревом в три слоя. Сколько управляемых состояний в итоге?
10. При управлении состоянием пациента изменяются три параметра: первый имеет 2 дискреты, второй - 3, третий - 4. Сколько состояний контролируется системой управления, если



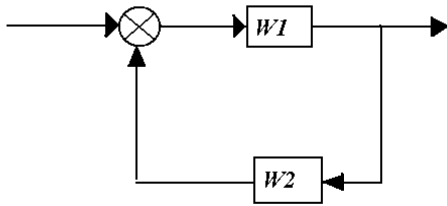
известно, что одновременно могут измеряться только две характеристики?

11. D-область устойчивости системы управления определяется уравнением  $a^2 + 2a + 1 + b^2 \leq 1$ ;  $a, b$  - целочисленные параметры. Сколько устойчивых состояний имеет система?
12. Цифровая система управления реализует функцию  $x_1 \& x_2$  ИЛИ  $x_2 \& x_3$ . Какие комбинации переменных соответствуют управляющему сигналу "1"? Управляющему сигналу «0»?
13. Чему равно значение полюса передаточной функции у апериодического звена первого порядка, если постоянная времени равна 5?
14. Чему равны значения полюсов передаточной функции колебательного звена с постоянным времени равным 2?
15. Чему равны значения полюсов передаточной функции апериодического звена второго порядка, у которого постоянные времени равны  $T_1=2$   $T_2=1$ ?
16. Чему равны значения полюсов передаточной функции апериодического звена второго порядка, у которого постоянные времени равны:  $T_1=10$   $T_2=5$ ?
17. Чему равны корни характеристического уравнения консервативного звена с постоянной времени  $T=1$ ?
18. Чему равны значения полюсов передаточной функции консервативного звена с постоянной времени 5?
19. Чему равна сумма корней характеристического уравнения апериодического звена второго порядка с постоянной времени 1?
20. Чему равна сумма корней характеристического уравнения апериодического звена второго порядка с постоянной времени 2?
21. Чему равно произведение корней консервативного звена с постоянной времени 1?
22. Чему равна сумма корней колебательного звена с постоянными времени равными 1?
23. Чему равно произведение корней колебательного звена с постоянной времени 1?
24. Корень характеристического уравнения апериодического звена первого порядка равен "-0,3". Чему равна (приблизительно) постоянная времени?

### Типовые задачи в форме тестов

К типовым задачам относятся следующие (входят в состав текущей и промежуточной аттестаций в устной и автоматизированной, тестовой формах):

1. Переходная функция — это:
  - 1) реакция на единичное ступенчатое воздействие;
  - 2) реакция на гармонический входной сигнал;
  - 3) реакция на произвольное входное воздействие;
  - 4) отношение выходного сигнала к входному воздействию.
2. Передаточная функция вида  $W_{(p)} = \frac{K}{T_p + 1}$  описывает динамику
  - 1) колебательного звена;
  - 2) дифференцирующего звена;
  - 3) апериодического звена;
  - 4) интегрирующего звена.
3. Элемент сравнения выполняет математическую операцию:
  - 1) сложения; вычитания; умножения; деления; логарифмирования.
4. Передаточная функция последовательного соединения динамических звеньев определяется как:
  - 1) сумма передаточных функций звеньев;
  - 2) произведение передаточных функций звеньев;
  - 3) разность передаточных функций звеньев.
5. Появление запаздывания в объекте, двухпозиционным регулятором с зоной неоднозначности приведет к:



1) появлению перерегулирования и уменьшению частоты переключения;

2) увеличению частоты переключения;

3) сохранению прежнего режима;

6. Передаточная функция параллельного соединения динамических звеньев определяется как

1) сумма передаточных функций звеньев;

2) произведение передаточных функций звеньев;

3) разность передаточных функций звеньев.

7. Согласно критерию устойчивости Найквиста замкнутая система будет устойчива, если амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы на комплексной плоскости не охватывает точку с координатами:

1)  $(0; j0)$ ; 2)  $(-1; j0)$ ; 3)  $(1; j0)$ ; 4)  $(1; j1)$ ; 5)  $(-0; -j1)$

8. Консервативное звено — колебательное звено, у которого коэффициент демпфирования равен:

1)  $\xi = 0$ ; 2)  $\xi = 0,5$ ; 3)  $\xi = 1$ ; 4)  $\xi > 1$ .

8. Необходимое условие устойчивости заключается в том, что коэффициенты характеристического уравнения должны быть:

1) разного знака; одного знака; равны нулю; равны.

9. Статическим является регулятор:

1) ПИ; 2) П; 3) ПИД; 4) ИД;

10. По роду используемой энергии системы автоматизации могут быть:

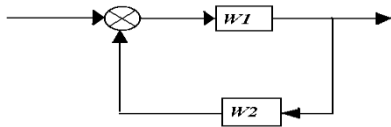
1) импульсными; 2) гидравлическими; 3) позиционными;

4) статическими;

11. Необходимое условие устойчивости по критерию Гурвица заключается в том, что все его определители должны быть:

- 1) разного знака;
- 2) одного знака;
- 3) равны нулю;
- 4) одинаковы.

12. Соединение, изображенное на рисунке, относится



1) к последовательному соединению;

2) к параллельному соединению;

3) к соединению с отрицательной обратной связью;

13. Обратная связь используется для принципа:

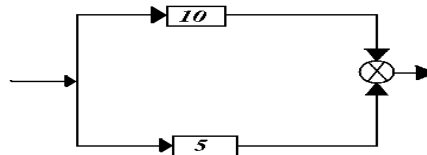
1) прямого управления;

2) по возмущению;

3) по отклонению;

4) по возмущению и отклонению.

14. Общий коэффициент усиления системы, представленной на



рисунке, соответствует:

1) 15

2) 5

3) 50

4) 2

15. В САР с двухпозиционным регулятором при увеличении зоны

неоднозначности частота переключения регулирующего органа:

1) не изменится;

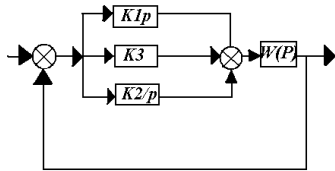
2) уменьшится;

3) возрастет.

16. Логическая функция вида  $F = X_1 + \overline{X_2} + X_3$  на выходе будет иметь логический ноль при комбинации переменных  $X_1X_2X_3$  на входе:

- 1) 000;
- 2) 001;
- 3) 010;
- 4) 011.

17. Регулятор со структурной схемой, показанной на рисунке, является



- 1) пропорционально;
- 2) пропорционально-интегральным;
- 3) пропорционально-дифференциальным;
- 4) пропорционально-интегрально-дифференциальным .

18. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) выражает зависимость:

- 1) амплитуды выходного сигнала от фазы;
- 2) амплитуды от частоты;
- 3) фазы от частоты;
- 4) амплитуды и фазы от частоты в комплексной форме.

19. При быстром изменении регулируемой величины на объектах управления с большим запаздыванием лучшее регулирование обеспечивает:

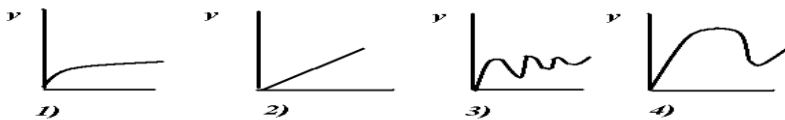
- 1) пропорциональный регулятор;
- 2) пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;
- 3) пропорционально-интегральный регулятор;
- 4) интегральный регулятор.

20. На рисунке представлен график переходного процесса системы автоматического регулирования с относительным перерегулированием, равным 1) 40%, 2) 20%, 3) 50%, 4) 60%.

21. Пропорциональный регулятор перемещает регулирующий орган на величину пропорционально:

- 1) отклонению регулируемой величины;
- 2) интегралу от сигнала рассогласования;
- 3) сумме отклонения и скорости отклонения;
- 4) сумме отклонения и интеграла от отклонения;
- 5) отклонению, интегралу и скорости отклонения

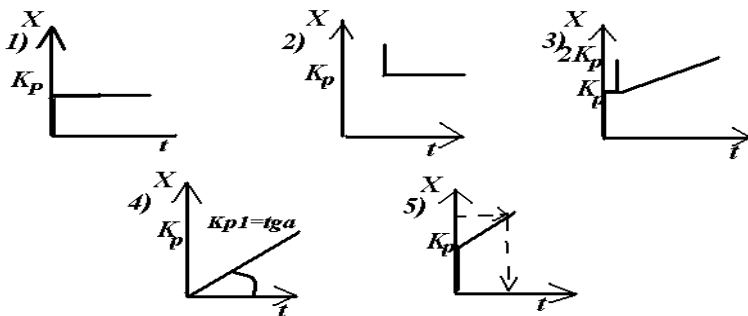
22. Интегрирующее звено имеет переходную характеристику вида



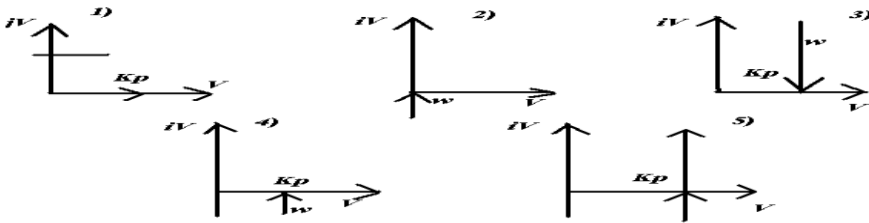
23. Пропорционально-интегральный регулятор перемещает регулирующий орган на величину пропорционально:

- 1) отклонению регулируемой величины;
- 2) интегралу от сигнала рассогласования;
- 3) сумме отклонения и скорости отклонения;
- 4) сумме отклонения и интеграла от отклонения;
- 5) сумме отклонения, интеграла и скорости отклонения.

24. Переходная характеристика пропорционального регулятора



25. Комплексная частотная характеристика интегрального регулятора имеет вид:



26. Генераторные датчики преобразуют измеряемую неэлектрическую величину:

- 1) в электродвижущую силу;
- 2) в сопротивление;
- 3) в частоту;
- 4) в емкость;

5) в индуктивность

27. Для измерения динамических давлений используют:

- 1) угольные датчики;
- 2) потенциометрические датчики;
- 3) пьезоэлектрические датчики;
- 4) мембранные датчики.

28. Манометрический термометр предназначен для измерения:

- 1) давления;
- 2) разности давления;
- 3) температуры;
- 4) разряжения

29. Трёхпроводная схема подключения термосопротивления к измерительному мосту применяется для:

- 1) повышения чувствительности;
- 2) устранения погрешности, вызванной изменением температуры окружающей среды;
- 3) повышения надежности;
- 4) устранения внешних помех.

30. Ротаметр предназначен для измерения:

- 1) частоты вращения вала;
- 2) расхода жидкости или газа;
- 3) количества жидкости или газа;
- 4) уровня жидкости.

31. Дифференциальный манометр предназначен для измерения:

- 1) избыточного давления;

- 2) давления разряжения;
- 3) разности давлений;
- 4) вакуума.

32. С увеличением температуры сопротивление металлического терморезистора:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не меняется;
- 4) изменение зависит от материала терморезистора.

33. Дифференциальный манометр предназначен для измерения:

- a. избыточного давления;
- b. давления разряжения;
- c. разности давлений;
- d. вакуума.

34. С увеличением температуры сопротивление металлического терморезистора:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не меняется;
- 4) изменение зависит от материала терморезистора.

35. Соответствие между видами динамических звеньев и их передаточными функциями

Динамическое звено	Передаточная функция
1. Безынерционное	А. $W(p) = k(Tp+1)$
2. Дифференцирующее	Б. $W(p) = k/p$
3. Интегрирующее	В. $W(p) = kp$
4. Апериодическое	Г. $W(p) = k/(Tp+1)$
	Д. $W(p) = k$

36. Соответствие между динамическими звеньями второго порядка и передаточными функциями

Передаточная функция	Динамическое звено
1. $W(p) = k/(T^2p^2 + 2fTp + 1)$	А. Колебательное
2. $W(p) = k/(TV + 1)$	Б. Изолдромное



	В. Консервативное
--	-------------------

37. Соответствие между видом логарифмической АЧХ и числовым значением наклона к оси абсцисс

Логарифмическая АЧХ	Численное значение
1. $L(\omega) = 20 \lg K + 20 \lg(\omega)$	А. +20 К db/dec
2. $L(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg(\omega)$	Б. -20 К db/dec
	В. +20 db/dec
	Г. -20 db/dec

58. В колокольном манометре выходным параметром является перемещение \_\_\_\_\_.

59. В зависимости от вида уравнений, описывающих процессы, системы автоматического управления могут быть: нелинейные и стационарные и \_\_\_\_\_, непрерывные и \_\_\_\_\_