

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.И. Сырямкин

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ
В РОБОТОТЕХНИКЕ
И МЕХАТРОНИКЕ



Издательство Томского университета
2016

УДК 330.51-7
ББК 65.011.151
С95

Рецензенты:

А.Н. Солдатов, д-р физ.-мат. наук, профессор,
заслуженный изобретатель РФ;

Ю.М. Осипов, д-р техн. наук, д-р экон. наук, профессор

Сырямкин В.И.

С95 Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учеб. пособие. (Серия: Интеллектуальные технические системы). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – 524 с.

ISBN 978-5-7511-2443-4

Учебное пособие посвящено актуальным вопросам проектирования, исследования, алгоритмического и программного обеспечения информационных устройств и систем, используемых в робототехнике и мехатронике.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям: 211000 «Конструирование и технология электронных средств», «Мехатроника».

УДК 330.51-7
ББК 65.011.151

Работа выполнена по программе повышения конкурентоспособности
Национального исследовательского Томского государственного
университета, грант РФФИ № 16-29-04388/16 от 19.04.2016.

ISBN 978-5-7511-2443-4

© Сырямкин В.И., 2016

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИС – информационная система
ИУС – информационные устройства и системы
СТЗ – система технического зрения
ТИ – текущее изображение
ЭИ – эталонное изображение
ОМ – объект манипулирования
ОР – объект распознавания
ДТИ – датчик текущего изображения
К – коммутатор (корпоратор)
ОК – оптический коммутатор
ИСо – информационная система образования
ИСП – информационная система проверяемая
РЗ – рабочая зона
УОИ – устройство отображения информации
ДИ – датчик изображения
ОС – осветительная система
ФСА – функционально-стоимостный анализ
ЗУ – запоминающее устройство
АСУ – автоматизированные системы управления
АСУП – автоматизированные системы управления предприятием
ГИС – геоинформационные системы
ИИЗС – информационно-измерительные системы
ИИС – интеллектуальные информационные системы
ИПС – информационные поисковые системы
САПР – система автоматизированного проектирования

ПРЕДИСЛОВИЕ

Информационные устройства и системы (УИС) находят все более широкое применение в различных сферах восприятия, обработки и хранения информации. Особый интерес представляет использование ИУС в робототехнике и мехатронике, стремительно развивающихся в последнее время.

Состав включенного в учебное пособие материала, его композиция были predetermined желанием по возможности привести все сведения, которые необходимы студентам, аспирантам, инженерам, преподавателям и исследователям, занимающимся изучением, разработкой и эксплуатацией ИУС, используемых в робототехнике и мехатронике. В книге подробно рассмотрены общие сведения об информации ИУС, метрологическом обеспечении и проектировании ИУС. Особое внимание уделено вариантам ИУС, широко используемых в робототехнике и мехатронике, системам автоматизированного проектирования (САПР), системам технического зрения (СТЗ). Представлено алгоритмическое и программное обеспечение СТЗ, описаны варианты реализации СТЗ. Важными являются введенные в каждой главе тесты и контрольные вопросы, а также предоставленный практический вариант САПР ИУС на основе современных дисциплин: функционально-стоимостного анализа и методов оптимизации.

Автор выражает искреннюю признательность: профессорам В.И. Гончарову и Ю.М. Осипову, доценту С.А. Воротникову за полезные замечания, высказанные после ознакомления с рукописью данной книги, а также С. Горбачеву, Д.С. Жданову, А.Ш. Бурееву, С.В. Шидловскому и Д.Н. Кузнецову, оказавшим большую помощь в подготовке книги.

Отзывы, критические замечания и пожелания по учебному пособию просьба направлять по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский государственный университет или: e-mail: egs@sibmail.com

ВВЕДЕНИЕ

1. Робототехника, мехатроника, информационные устройства и системы

Около века назад чешский писатель Карел Чапек создал пьесу «Рур» («Россумские универсальные роботы»), персонажами которой были люди и роботы (искусственные люди). В этой пьесе впервые появилось новое понятие «робот», которое вскоре стало играть важную роль в фантастической литературе, науке и технике. Одно из первых определений «робот»: «Роботы – это не люди, ...механически они совершеннее нас, они обладают невероятно сильным интеллектом, но у них нет души» [1].

В настоящее время в мире разработано и широко используется большое семейство различных роботов, заменивших людей на опасных для здоровья и тяжелых физических работах. Структурно-функциональная схема робота, взаимодействующего с окружающей средой, представлена на рис. 1 [1].

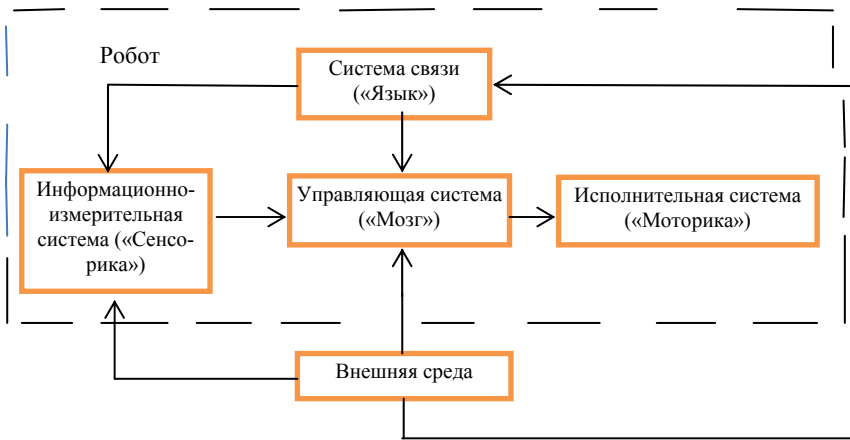


Рис. 1. Структурно-функциональная схема робота

Робот в общем случае состоит из 4 систем: информационно-измерительной («Сенсорика»), управляющей («Мозг»), исполнительской («Моторика») и системы связи с другими роботами, человеком или внутренними системами робота («Язык»).

Информационно-измерительная система («Сенсорика») – это искусственные органы чувств робота, которые предназначены для восприятия и преобразования информации о состоянии внешней среды и самого робота в соответствии с потребителями управляющей системы («мозга») робота.

Управляющая система («Мозг») робота предназначена, во-первых, для выработки закона управления приводами (двигателями) механизмов исполнительской системы, используя сигналы обратной связи от информационно-измерительной системы; во-вторых, для общения робота с человеком на каком-либо языке. Интеллектуальные способности робота определяются управляющей и информационно-измерительной системой [1].

Исполнительная система («Моторика») робота служит для выполнения управляющих сигналов (программы), формируемых управляющей системой, а также воздействия на окружающую среду. Примеры исполнительных систем: манипуляторы (механические руки), педипуляторы (механические ноги), самоходные тележки, 3D-томографы и др.

Система связи робота предназначена для организации обмена информацией между системами робота, между роботом и человеком или другими роботами на понятном им языке. Цель такого обмена – формулировка человеком заданий роботу, организация диалога между человеком и роботом, контроль за функционированием робота, диагностика неисправностей и регламентная проверка робота. Информация от человека к роботу обычно поступает через пульт управления или через устройство ввода (набор команд с клавиатуры, речевое общение, ввод видеoinформации, ввод информации с помощью биопотенциалов и др.) [1, 2].

Таким образом, человек может передавать информацию роботу как путем непосредственного ее занесения в память управляющей системы, так и путем воздействия через искусственные органы чувств.

Следует отметить, что робот отличается от разного рода автоматов его способностью к обучению путем активного взаимодействия с реальным миром. В отличие от автоматов роботы – это универсальные

автоматические системы многоцелевого назначения (способны переобучиться с одной операции (задачи) на другую). Robotами называют универсальные автоматические системы, способные обучаться в процессе активного взаимодействия с окружающей средой и предназначенные для имитации разнообразных операций, совершаемых человеком в процессе физического или умственного труда [1].

Таким образом, отличительными чертами роботом являются их универсальность, способность к обучению и адаптации в процессе восприятия (с помощью искусственных органов чувств) и воздействие на окружающую среду (с помощью исполнительных механизмов), а также многоцелевое назначение, связанное с автоматизацией физической и интеллектуальной деятельности человека [Там же].

В зависимости от развитости сенсорной системы и системы управления роботы делятся на четыре поколения.

Роботы первого поколения – это роботы с программным управлением (программные роботы), которые предназначены для выполнения определенной жестко запрограммированной последовательности операций, определяемой технологическим процессом. Управление роботами первого поколения осуществляется по заранее заданной программе и при строго определенных и неизменных условиях функционирования. Переобучение (изменение программы) роботом первого поколения новым операциям сделало эти роботы достаточно универсальными и гибко перестраиваемыми на различные классы задач в пределах функциональных возможностей данного робота [Там же]. Программные роботы применяются для обслуживания станков, печей, прессов, сборочных конвейеров и технологических линий, сварочных аппаратов, литейных машин и др.

Роботы второго поколения – это оучувствленные (адаптивные) роботы, которые отличаются от программных роботом, во-первых, значительно большим ассортиментом внешних сенсорных датчиков (оптических, телевизионных, локационных, тактильных и т.п.) и внутренних датчиков (датчики положений звеньев манипулятора, датчики усилий и моментов и т.п.), во-вторых, более сложной системой управления. Роботы второго поколения, благодаря способности воспринимать изменения во внешней среде, анализировать сенсорную информацию и приспосабливаться к существующим условиям функционирования, способны работать с неориентированными деталями произвольной формы, осуще-

ствлять сборочные и монтажные операции, собирать информацию о неизвестной внешней среде и т.п. [1].

Роботы третьего поколения – это интеллектуальные, или разумные, роботы, которые отличаются от роботов второго поколения сложностью и совершенством управляющей системы, включающей в себя элементы искусственного интеллекта. Эти роботы предназначены главным образом для автоматизации интеллектуальной деятельности человека (для решения интеллектуальных задач). Характерной особенностью интеллектуальных роботов является их способность к обучению и адаптации в процессе решения к сложности задач [Там же].

Роботы четвертого поколения – это когнитивные распределенные коллективные роботы, обладающие эмоциями и превосходящие человека по скорости обработки информации и реакции на окружающую среду, способные адаптироваться в любых изменяющихся условиях, «вживаться» в живые организмы, иметь совершенную систему управления аналогично мозгу человека и в некотором смысле фантастически способные создавать себе подобных. К этому поколению роботов относятся виртуальные роботы, которые создаются в пространстве специальными оптическими, световыми и компьютерными спецэффектами.



Рис. 2. Классификация роботов

В зависимости от совершенства робота и области его применения четыре поколения роботов классифицируются на четыре класса: производственные, исследовательские, военные и учебные [1, 5] (рис. 2).

Рассмотрим подробнее эту классификацию.

Производственные роботы предназначены для выполнения тяжелой, монотонной, вредной и опасной для здоровья людей физической работы (манипуляторы в атомной промышленности, роботы для обработки).

Промышленные роботы предназначены в основном для автоматизации всех видов ручных и транспортных операций в различных отраслях промышленности (сборка автомобилей, бытовой техники, часов, покраска корпусов, подготовка продуктов питания). Различают роботы для обработки земли и сбора урожая, а также транспортные роботы, строительно-монтажные, бытовые роботы для уборки помещений и игровых развлечений и сборки мусора на территории города.

Исследовательские роботы служат для поиска, сбора, переработки информации об исследуемых объектах (космические и океанологические исследования, исследование Арктики), проектирования сложных объектов, информационного поиска и анализа материалов, исполнения музыкальных произведений, диагностики и лечения различных заболеваний, операций патологий в медицине.

Военные роботы обеспечивают охрану объектов, разведку территорий, уничтожение террористов и взрывчатых веществ, а также выполняют мероприятия Министерства по чрезвычайным ситуациям (тушение пожара, разбор завалов при авариях, химический анализ территорий, транспортировка опасных грузов).

Учебные (образовательные) роботы осуществляют подготовку кадров по школьным и университетским программам, курсам повышения квалификации, а также с помощью учебных тренажеров и медицинских учебных роботов (оказание первой помощи человеку при различных повреждениях, акушерские операции, функционирование в системе телемедицины).

Кроме этого, от степени автоматизации или степени участия человека в процессе управления роботы подразделяются на два класса: биотехнические и автономные (автоматические). К биотехническим роботам относятся дистанционно управляемые копирующие роботы,

экзоскелетоны, управляемые человеком от пульта управления, и полуавтоматические роботы.

Копирующие роботы имеют задающий орган, например манипулятор, полностью идентичный исполнительному (с уменьшенным, увеличенным или одинаковым масштабом по геометрическим размерам и усилиям), а также средства отображения для человека-оператора среды обитания робота. Управляющая система обеспечивает желаемое движение, заданное человеком-оператором, и полностью копируется с точностью до масштабного коэффициента исполнительным органом [1].

Экзоскелетоны представляют собой антропоморфные конструкции, которые обычно «одеваются» на руки, ноги или корпус человека и служат для воспроизведения (копирования) их движений с масштабным коэффициентом по усилиям. Другая разновидность роботов с биотехническим управлением – это роботы, управляемые человеком с пульта управления [Там же]. Полуавтоматные роботы сочетают ручное и автоматическое управление.

Роботы с автономным или автоматическим управлением функционируют без участия человека, исключая введение программы работы (профилактику и ремонт). Позже, в 80-е гг. XX в., наряду с робототехникой появился термин «мехатроника», предполагающий непосредственное внедрение микроэлектронных устройств в систему управления и позволяющий создавать эффективные регуляторы. В дальнейшем термин «мехатроника» был существенно обобщен, и к этой области теперь относятся также системы, которые не являются робототехническими, например: системы управления комплексами технологического оборудования, обрабатывающие центры, системы поддержания заданной температуры в помещении, системы охраны территорий, медицинские диагностические и терапевтические системы, системы телемедицины. Функционирование таких систем связано с выполнением разнообразных измерений, для чего их оснащают соответствующими сенсорными устройствами. Таким образом, можно утверждать, что создание информационно-сенсорных систем является самостоятельным направлением, имеющим очень широкое применение в робототехнике и мехатронике [2, 3]. Ниже дадим определения термина «мехатроника» применительно к современному быстро развивающемуся научно-техническому направлению «Нанотехнологии» [4].

Наномехатроника – область науки и техники, лежащая на стыке наномеханики, наноэлектроники, наноинформатики и наноавтоматики.

Наномехатроника – раздел мехатроники, нанотехнологий и кибернетики.

Наномехатроника – основа микроэлектроники и микроробототехники.

Наномехатроника основана на наноструктурном объединении механики, датчиков состояния внешней среды и самого нанообъекта, источников энергии, усилителей, исполнительных и вычислительных устройств.

2. Принципы построения информационных устройств и систем

Рассмотрим некоторую активную робототехническую систему, содержащую информационные устройства и системы (ИУС), которая взаимодействует с внешней средой. Предположим, что эта активная робототехническая система имеет априорную информацию I_a о среде и в процессе функционирования получает текущую информацию I_t как о внешней среде I_b , так и о собственном состоянии (I_c). Целью активной робототехнической системы является принятие решений, связанных с преобразованием или анализом внешней среды. Чаще всего информация I_t бывает неполной, поэтому робототехническая система функционирует в условиях неопределенности. В этой связи под адаптацией будем понимать способность активной робототехнической системы достигать заданных целей в условиях неопределенности на основе использования текущей информации о собственном состоянии и состоянии среды. При этом могут изменяться параметры робототехнической системы, ее структура и алгоритм функционирования [2].

В соответствии с вышеизложенным преобразуем структурную схему робота (см. рис. 1) в виде структурной схемы активного адаптивного робота, представленной на рис. 3. В состав информационной системы здесь входят подсистема восприятия среды, подсистема связи, подсистема планирования, эффекторная подсистема, а также информационный блок «Модель среды». Представленная схема на рис. 3 функционирует следующим образом. Сигналы с датчиков

преобразуются, кодируются, фильтруются блоком обработки данных и с помощью блока анализа объектов и сцен определяются необходимые параметры рабочей сцены.

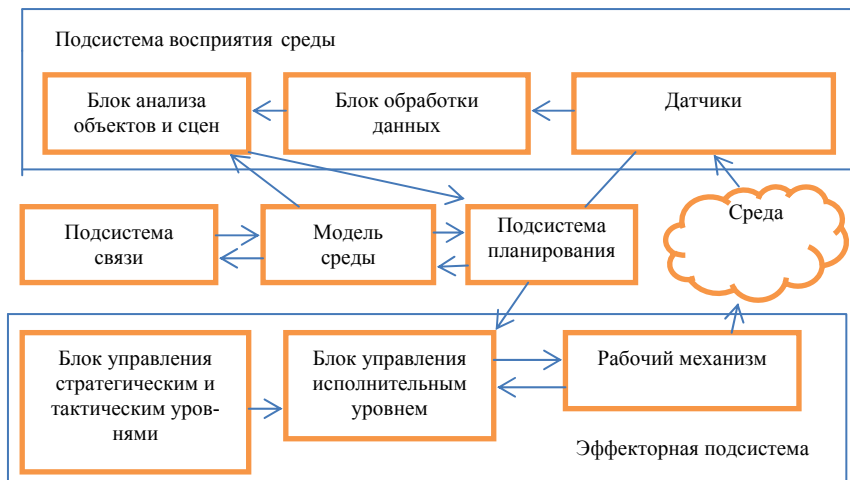


Рис. 3. Структурная схема адаптивного робота

При анализе используется модель среды в виде априорной информации (математической модели) I_a о рабочей сцене, которая уточняется с помощью подсистемы связи. Полученная информация используется на исполнительном, тактическом и стратегическом уровнях. Эти движения реализуются рабочим механизмом (манипулятор, транспортная тележка) [2].

Дадим основные определения элементов ИУС.

Первичным преобразователем или чувствительным элементом (ЧЭ) называется простейший элемент информационной системы, изменяющий свое состояние под действием внешнего возмущения (например, фототранзистор, фотодиод или тензорезистор) [Там же].

Датчик представляет собой устройство, которое под воздействием измеряемой величины выдает эквивалентный сигнал (ток, напряжение, импеданс), являющийся однозначной функцией измеряемой величины [Там же].

Кинестетические датчики формируют информационный массив

данных об обобщенных координатах и силах (положении и относительных перемещениях отдельных рабочих органов и развиваемых ими усилиях). Кинестетические датчики измеряют положение, скорость, силу и моменты в соглашениях многозвенного механизма [Там же].

Локационные датчики предназначены для определения и измерения физических параметров среды путем излучения и приема отраженных от объектов сигналов (оптических, акустических, электромагнитных). По значениям этих параметров формируется локационный образ среды (сцены), который используется для идентификации объектов [Там же].

Визуальные датчики обеспечивают получение информации о геометрических и физических характеристиках внешней среды на основе анализа ее освещенности в оптическом диапазоне (инфракрасном, рентгеновском, СВЧ). Примером являются телевизионные системы [Там же].

Тактильные контактные датчики определяют характер контакта с объектами внешней среды в целях их распознавания или оценки границы сцены. Эти датчики выполняются в виде тактильных матриц или силомоментных датчиков. Контактными являются также кинестетические датчики [1].

Генераторные датчики являются источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала.

Представители генераторных датчиков: термоэлектрические датчики; устройства, функционирующие на основе пиро- и пьезоэлектрических эффектов, фотоэффекта, эффекта Холла, а также на явлении электромагнитной индукции и др. [2].

Параметрические датчики силы давления, перемещения под воздействием измеряемой величины меняют некоторые параметры выходного импеданса, который обусловлен его геометрией и размером элементов, а также электромагнитными свойствами материала: удельным сопротивлением R , относительной магнитной проницаемостью M , относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r . В параметрических датчиках сигнал формируется измерительной цепью (потенциометрической или мостовой схемой, колебательным контуром, операционным усилием) [Там же].

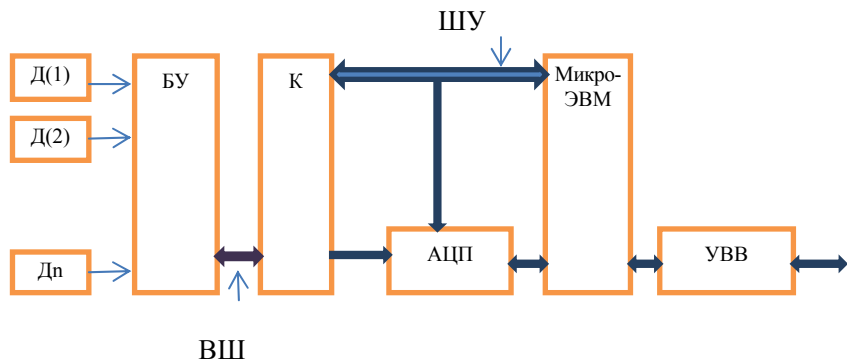


Рис. 4. Пример функциональной схемы информационной системы:
 Д1-Дп – датчики; БУ – блок усилителей; К – коммутатор;
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УВВ – устройство ввода-вывода;
 ВШ – внутренняя шина; ШУ – шина управления

Примеры использования информационных устройств и систем в роботах [2]

Уровень управления	Основные задачи, решаемые с помощью информационной системы	Информационные средства
Исполнительный	Обеспечение монотонности движения захвата. Устранение взаимовлияния звеньев манипулятора. Обеспечение стабильности динамических характеристик приводов	Датчики положения, скоростей, ускорения; однокомпонентные датчики измерения момента на валу
Тактический	Обеспечение необходимой силы захвата. Самонаведение и торможение вблизи неизвестных препятствий	Тактильные матрицы, датчики проскальзывания; оптические, индуктивные и емкостные датчики; видеокамеры; ультразвуковые дальномеры
Стратегический	Нахождение маршрута движения в недетермированной обстановке. Развитие необходимых усилий при работе со связанными объектами. Поиск и распознавание заданных объектов, определение их взаимного положения	Разнообразные дальномеры, системы технического зрения и силомоментного оучувствления

К робототехническим и мехатронным датчикам предъявляются следующие требования [2]:

1) унифицированность (имеет нормативный диапазон выходного сигнала);

2) высокая надежность и помехоустойчивость в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжения и частоты;

3) малогабаритность, простота конструкции, «размещаемость» на захватном устройстве и других частях манипулятора при ограниченной площади в объеме;

4) развязка выходных и входных цепей, простота юстировки и обслуживания;

5) возможность абсолютного отсчета параметров.

Пример функциональной схемы информационной системы приведен рис. 4. Один или несколько датчиков в совокупности с усиливающими, коммутирующими, преобразующими, запоминающими и передающими устройствами образуют информационную систему. В этой информационной сенсорной системе сигналы (с датчиков) после предварительного усиления и преобразования в цифровую форму поступают на микро-ЭВМ, выполняющую интегральную оценку измерительного процесса. Затем формируется сообщение на верхний уровень ИУС или в систему управления [Там же].

В робототехнике ИУС используются на трех уровнях управления: исполнительном, тактическом и стратегическом (таблица).

3. Бионические основы информационных устройств и систем

В робототехнике принят антропологический подход в терминологии, основанный на использовании принятых в биологии, биофизике и психологии терминов для обозначения соответствующих робототехнических свойств. Следует отметить, что антропологический подход (биологические и биофизические аналогии) называют бионическим [2].

Из всего множества воздействующих на организм человека факторов окружающей среды лишь некоторые улавливаются сенсорными органами. Эти факторы называются сенсорными стимулами. В ходе эволюции у всех организмов развились специализированные сенсорные органы, оптимальным образом отвечающие на опреде-

ленные стимулы и квалифицирующиеся на три группы: экстероцепторы, проприоцепторы и интероцепторы. Экстероцепторы – это рецепторы, стимулируемые окружающей средой и участвующие в реализации слуховой, визуальной и тактильной сенсорных функций. Проприоцепторы регулируют длину мышц, натяжения сухожилий и других параметров положения внешних органов и движения, а также управляют вестибулярным аппаратом. Эти рецепторы участвуют в кинестетической и тактильной сенсорных функциях. Интероцепторы регистрируют информацию, поступающую от внутренних органов тела (датчики температуры, кровяного давления, состава крови и т.п.). Причем большая часть информации, посылаемой в центральную нервную систему интеро- и проприоцепторами, не воспринимается сознанием [Там же].

Восприятие внешнего мира человеком осуществляется через распределенную информационную сеть, состоящую из шести основных каналов сенсорной рецепции. Это каналы органов чувств: *слух, зрение, осязание, терморепцепция, обоняние и вкус*. В каждом из них возбуждение регистрируется системой чувствительных элементов (ЧЭ)-рецепторов, специфических для разных сенсорных функций, и передается по каналу связи (нервному волокну) в виде потенциалов действий. Система рецепторов каждой функции (модальности) связана с определенными отделами центральной нервной системы [Там же].

Распознавание сенсорного образа у человека является результатом совместной деятельности информационной системы и мозга, причем значительная часть информации обрабатывается уже на уровне рецепторов.

С позиции бионики *кинестетические рецепторы*, содержащиеся в каждой мышце, являются информационными элементами исполнительного уровня управления (т.е. являются датчиками соответствующих контуров регулирования). Они регистрируют изменения относительно положения отдельных элементов двигательной системы. Кинестетическая функция реализуется вестибулярным аппаратом и обеспечивает надлежащую ориентацию в пространстве всего организма. Кинестетическая рецепция соответствует информационной системе тактического уровня управления. Исполнительным механизмом организма является скелет, двигательная активность которого

формируется посредством связок и суставов (кинематических пар), а также мышц (приводов) [Там же].

Слуховая рецепция обеспечивает восприятие и анализ звука, который характеризуется четырьмя измерениями: объем, громкость, плотность и высота. Причем эти свойства звука определяются двумя физическими переменными сигнала: его амплитудой и частотой. Слуховой аппарат животных и человека состоит из трех основных частей: наружного, внутреннего и среднего уха. Наружное ухо, представляющее собой резонатор, имеет собственную резонансную частоту около 3 кГц. Среднее ухо содержит систему мелких косточек – молоточек, наковаленка и стремечко, отделенные от наружного уха барабанной перепонкой. Внутреннее ухо – улитка – представляет собой спирально закрученный костный канал (у человека он имеет 2,5 витка, у животных – до 5). В улитке находится основной орган слуха – базилярная мембрана с расположенными на ней волосковыми рецепторами. Базилярная мембрана представляет собой своеобразный фильтр, в котором высокочастотные колебания распространяются лишь в области, где жесткость мембраны высока, а низкочастотные проходят всю мембрану, вплоть до ее вершины. Слуховая ориентация в пространстве определяется бинауральным эффектом, основанным на том, что расстояния от каждого источника звука различны, а следовательно, различны уровни звуковых давлений в барабанных перепонках. Слуховая система способна воспринимать эту разницу уже на уровне 1 дБ. Вычисленная временная задержка составит около $3 \cdot 10^{-5}$ с, что соответствует смещению источника относительно центральной линии на 3 град (т.е. это соответствует точности ориентации в пространстве). При определенных навыках точность ориентации можно удвоить [Там же].

Зрительная рецепция – это визуальные анализаторные системы человека, составляющие сложные многоуровневые образования, служащие для анализа оптических сигналов. Мозг создает целостную картину из последовательности дискретных изображений, смещаемых каждые 200–600 мс, воспринимаемых зрением путем взаимодействия сенсорных и двигательных механизмов глаз и центральной нервной системы. Рассмотрим оптическую схему зрительной системы. На рис. 5 представлена схема бинокулярного зрения [Там же].

Изображение объекта проецируется на сетчатку справа от центральной ямки в левом глазу и слева от нее в правом. Это позволяет

при бинокулярном зрении создавать неперекрывающиеся двойные изображения. Их наложение осуществляется в так называемом циклопическом глазе – воображаемом органе, в который проецируется сетчатка правого и левого глаза (см. рис. 5). Установлено, что изображение не будет двоиться, если объект находится в области горютера – криволинейной поверхности, на которой лежат узловые точки обоих глаз и точки фиксации. Бинокулярное зрение у людей не является врожденным и формируется в возрасте 8–27 недель.

Левое двойное изображение

Правое двойное изображение

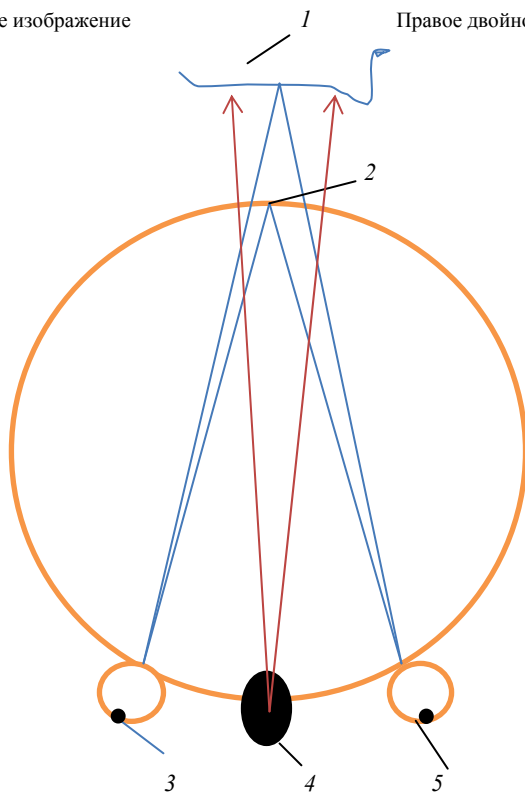


Рис. 5. Схема бинокулярного зрения: 1 – объект; 2 – горютерный круг; 3 – центральная ямка; 4 – «циклопический» глаз; 5 – точка фиксации

Тактильная рецепция является самой значимой сенсорной функцией. Если отсутствие специальных видов чувствительности – зрения, слуха, обоняния и т.д. – не приводит к гибели организма, то отсутствие тактильной (кожной) рецепции несовместимо с жизнью [2]. Существо, лишенное возможности воспринимать тактильную информацию, не могло бы уберечься от опасных внешних воздействий, о которых сигнализируют болевые ощущения. Кожа является предохранительной оболочкой организма. Ее общая площадь достигает в среднем $2,5 \text{ м}^2$. Внутри кожи выделяются 4 самостоятельных вида рецепции: температурная (тепловая и холодовая), тактильная, болевая и вибрационная (иногда ее характеризуют как зависимую от трех других). Этим четырём видам кожной чувствительности соответствуют различные рецепторные аппараты:

- а) колбочки Краузе, формирующие ощущение холода;
- б) цилиндрические рецепторы Руффини, раздражение которых дает тепловые ощущения;
- в) корзинчатые сплетения и тельца Меснера, ответственные за возникновение ощущений прикосновения и давления;
- г) свободные нервные окончания, связанные с болевыми функциями.

В целом кожа и опорно-мышечный аппарат представляют собой огромный распределенный рецептор, который вынесен наружу для первичной обработки контактных действий.

Таким образом, кратко рассмотренные важнейшие биологические механизмы сенсорных функций являются прототипом информационной (сенсорной) системы робота. Здесь следует отметить, что во многих случаях одна и та же поведенческая задача может быть решена путем объединения нескольких сенсорных функций. Такой принцип замещения широко используется в робототехнике.

4. Рекомендации применения информационных устройств и систем

Выше уже отмечалось, что информационные устройства и системы, как и органы чувств человека, предназначены для сбора информации о состоянии внешней среды и внутреннем состоянии робота. В качестве ее элементов используются телевизионные, светолокационные, ультразвуковые, тактильные и другие датчики. Функ-

ционально органы очувствления роботов (мехатронных систем) – датчики – можно подразделить на два основных класса: датчики внутреннего состояния и датчики внешнего состояния (рис. 6).

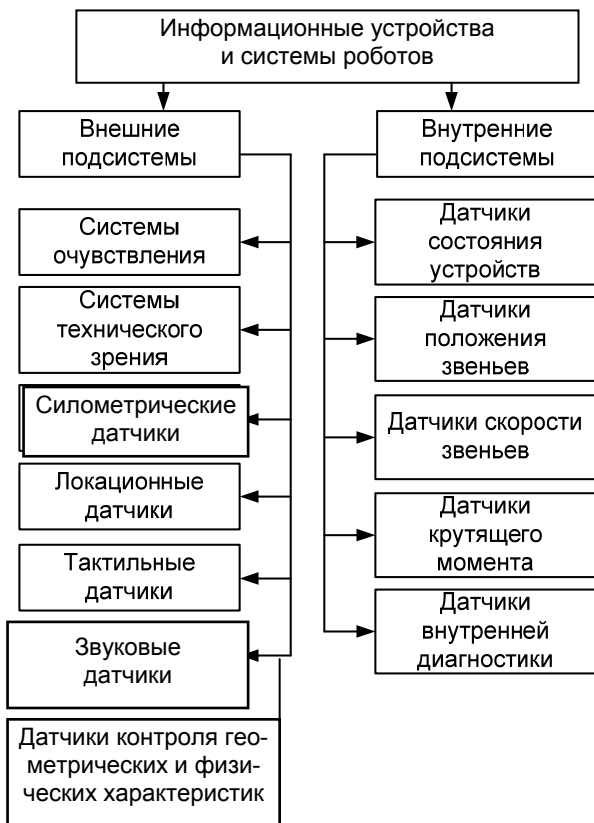


Рис. 6. Классификация информационных устройств и систем, используемых в промышленных роботах

Датчики внутреннего состояния служат для формирования сигналов в цепях обратных связей по положению и скорости звеньев манипулятора, по силе и моменту.

Датчики внешнего состояния предназначены для измерения параметров в дальней и ближней зонах и для тактильных измерений. Эти датчики подразделяются на контактные и бесконтактные. Контактные датчики производят измерение при контакте с объектом в процессе касания, проскальзывания или кручения. Принцип действия бесконтактных датчиков основан на определении изменений акустического или электромагнитного полей взаимодействия с объектом.

Принцип действия, структура и характеристика ИУС приведены в предыдущем разделе. При проектировании робототехнических и мехатронных систем следует правильно выбирать приводные устройства в соответствии с элементарными сочленениями. Известно всего шесть различных элементарных сочленений: вращательное, плоское, поступательное (призматическое), цилиндрическое, сферическое, винтовое (рис. 7).



Рис. 7. Элементарные сочленения

В общем случае два звена соединяются элементарным сочленением, имеющим две соприкасающиеся поверхности, скользящие относительно друг друга.

В качестве примера рассмотрим размещение датчиков в манипуляторе.

Манипулятор – оснащенное рабочим органом механическое устройство, предназначенное для перемещения в пространстве тела (объекта манипулирования), удерживаемого захватом. Манипулятор (лат. «manipulus» – пригоршня) можно рассматривать как аналог руки человека. Его конструкция в большей степени определяет возможности робота. Эти возможности значительно ниже возможностей руки человека, которая обладает 27 степенями подвижности или, если не учитывать движения пальцев руки, 12 степенями подвижности. Число степеней подвижности манипулятора ограничено и обычно не превышает семи.

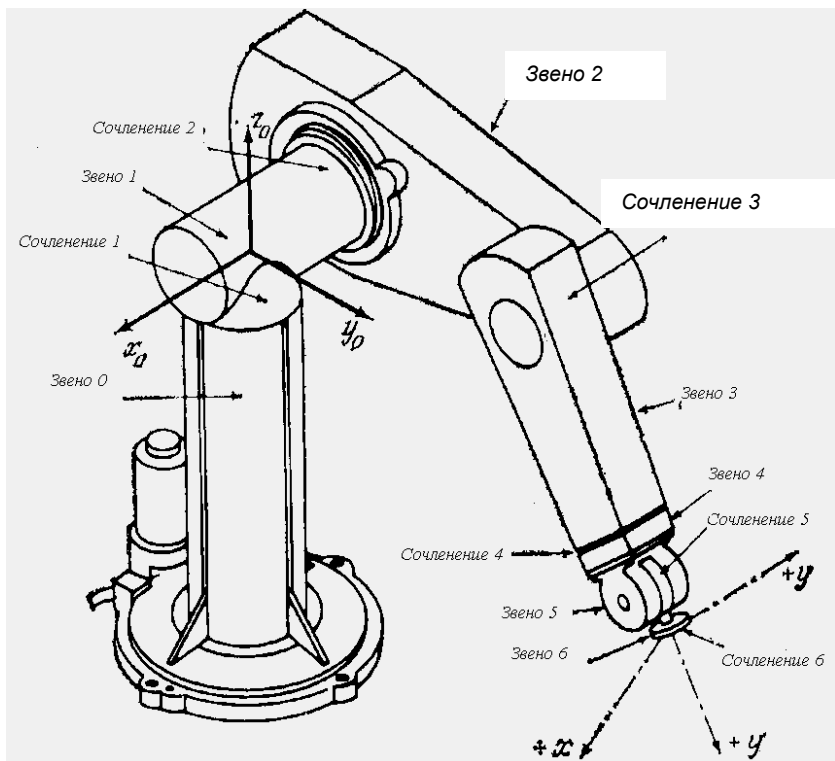


Рис. 8. Звенья и сочленения манипулятора Пума

Механический манипулятор состоит из звеньев, соединенных вращательными или поступательными сочленениями (рис. 8). Каждая пара, состоящая из звена и сочленения, обеспечивает одну степень свободы. Следовательно, манипулятор с N степенями свободы содержит N пар «звено–шарнир». Звено 0 соединено с основанием, где обычно размещается инерциальная система координат динамической системы, а последнее звено снабжено рабочим инструментом.

Звенья и сочленения нумеруются по возрастанию от стойки к схвату манипулятора. Каждое звено соединено не более чем с двумя другими так, чтобы не образовывалось замкнутых цепей.

Таким образом, в соответствии с кинематической схемой манипулятора необходимо разместить датчики положения его звеньев и приводные устройства.

Тесты к введению

1. Робот включает следующее количество систем: 2, 3, 4 (каких?).
2. Роботы классифицируются на следующее число поколений: 2, 3, 4 (каких?).
3. Информационные устройства и системы имеют следующее количество уровней управления: 2, 3, 4 (каких?).
4. Укажите правильный ответ: информационные устройства и системы состоят из:
 - 1) внешних подсистем и внутренних подсистем;
 - 2) системы очувствления и систем технического зрения;
 - 3) датчиков положения звеньев и датчиков внутренней диагностики.

Контрольные вопросы к введению

1. Изобразите структурно-функциональную схему робота и поясните работу элементов робота. Дайте определение термину «робот».
2. Дайте и поясните классификацию роботов.
3. Раскройте термин «мехатроника» и приведите примеры.
4. Каковы принципы построения информационных устройств и систем, используемых в робототехнике и мехатронике?
5. Поясните принцип действия бионических систем.
6. Каковы рекомендации применения информационных устройств и систем, используемых в робототехнике и мехатронике?

Список литературы к введению

1. Тимофеев В.А. Роботы и искусственный интеллект. М.: Наука, 1978. 192 с.
2. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем : учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.
3. Изоткина Н.Ю., Осипов Ю.М., Сыряжкин В.И. Инновационные технологии управления в мехатронике и робототехнике: учеб. пособие / под общ. ред. Ю.М. Осипова. Томск: Изд. Дом ТГУ, 2015. 220 с.
4. Богомолов Е.Н., Бубенчиков М.А., Жданов Д.С. и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий : учеб. пособие (лабораторный практикум) / под ред. В.И. Сырямкина. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 412 с.
5. Сыряжкин В.И., Титов В.С. и др. Системы технического зрения: справочник / под ред. В.И. Сырямкина, В.С. Титова. Томск: МГП «РАСКО», 1992. 367 с.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

1.1. Введение

Наряду с материей и энергией *информация* является первичным понятием нашего мира и поэтому в строгом смысле не может быть определена. Можно лишь перечислить ее основные свойства, например:

- 1) информация приносит сведения об окружающем мире, которых в рассматриваемой точке не было до ее получения;
- 2) информация не материальна, но она проявляется в форме материальных носителей дискретных знаков или первичных сигналах;
- 3) знаки и первичные сигналы несут информацию только для получателя, способного распознать.

Информация, основанная на однозначной связи знаков или сигналов с объектами реального мира, называется семантической или смысловой. Информация, заключенная в характере (порядке и взаимосвязи) следования знаков сообщаемой, называется синтаксической. Также в общей науке о знаках (семиотике) кроме перечисленных выделяют сигматический и прагматический аспекты информации. В первом случае изучается вопрос о выборе знаков для обозначения объектов реального мира, во втором – о ценности информации для достижения поставленных целей [1].

В данной главе изложены основные элементы теории информации, дано понятие сигнала, описаны классы и типы сигналов. В общем виде рассмотрена модель информационных систем, включая системы связи, системы хранения и преобразования информации. Классифицированы информационные системы, используемые в мехатронике.

1.2. Общие сведения из теории информации

Большая часть используемой нами информации сообщается посредством того или иного «языка», подчиняющегося определённым

статистическим закономерностям. В простейшем случае, когда сообщения записываются при помощи n символов x_i , относительные частоты появления которых взаимно независимы и полностью определяются априорными вероятностями $P(x_i)$, справедливо [1]

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1.$$

К основным свойствам информации следует отнести:

1. Количество информации $I(x_i, y_j)$ относительно события x_i , доставляемое событием y_j , определяется как логарифм отношения апостериорной вероятности $P(x_i, y_j)$ к априорной $p(x_i)$:

$$I(x_i y_j) = \log \frac{P(x_i / y_j)}{p(x_i)}.$$

2. Мера количества информации является симметричной функцией относительно x_i и y_j :

$$I(x_i, y_j) = I(y_j, x_i).$$

Информация, доставляемая событием y_j относительно события x_i , равна информации, доставляемой событием x_i относительно события y_j .

3. При фиксированной вероятности взаимная информация $I(x_i, y_j)$ достигает максимума, когда $P(x_i / y_j) = 1$, т.е. когда y_j достоверно однозначно определяет x_i :

$$I(x_i) = -\log p(x_i).$$

4. Взаимная информация удовлетворяет условиям аддитивности:

$$I(x_i; y_j, z_k) = \log \frac{P(x_i / y_j z_k)}{P(x_i)},$$

т.е. информация I получается относительно x_i при совместности наблюдении двух событий y_j и z_k .

Процесс преобразования сообщения в комбинацию символов в соответствии с кодом называется **кодированием**, процесс восстановления сообщения из комбинации символов называется **декодированием**. Код – универсальный способ отображения информации при её хранении, передаче и обработке.

Конечная последовательность символов a_j называется **словом** в данном алфавите. Каждое слово, входящее в код, называется кодовым словом (кодовой комбинацией). Различают равномерный, неравномерный, прямой, обратный, дополнительный коды.

Равномерными называют коды, у которых все комбинации имеют одинаковую длину. Для равномерного кода число возможных комбинаций равно m^n . Примером такого кода является пятизначный код Бодо, содержащий пять двоичных элементов ($m = 2, n = 5$). Число возможных кодовых комбинаций равно $2^5 = 32$, что достаточно для кодирования всех букв алфавита. Применение равномерных кодов не требует передачи разделительных символов между кодовыми комбинациями.

Неравномерные коды характеризуются тем, что у них кодовые комбинации отличаются друг от друга не только взаимным расположением символов, но и их количеством. Это приводит к тому, что различные комбинации имеют различную длительность. Типичным примером неравномерных кодов является код Морзе, в котором символы 0 и 1 используются только в двух сочетаниях – как одиночные (1 и 0) или как тройные (111 и 000). Сигнал, соответствующий одной единице, называется точкой, трем единицам – тире. Символ 0 используется как знак, отделяющий точку от тире, точку от точки и тире от тире. Совокупность 000 используется как разделительный знак между кодовыми комбинациями [1].

Прямой код – код двоичного числа, совпадающий по изображению с записью самого числа. Значение знакового разряда для положительных чисел равно 0, а для отрицательных – 1. Знаковым разря-

дом обычно является крайний разряд в разрядной сетке. В ряде случаев при записи кода знаковый разряд отделяется запятой. Например, в случае, когда для записи кода выделен один байт, для числа +1101 прямой код 0,0001101, для числа –1101 прямой код 1,0001101.

Обратный код для положительного числа совпадает с прямым кодом. Для отрицательного числа все цифры числа заменяются на противоположные (1 на 0, 0 на 1), а в знаковый разряд заносится единица. Например, для числа +1101 прямой код 0,0001101; обратный код 0,0001101. Для числа –1101 прямой код 1,0001101; обратный – 1,1110010.

Дополнительный код положительного числа совпадает с прямым кодом. Для отрицательного числа дополнительный код образуется путем получения обратного кода и добавлением к младшему разряду единицы.

1.3. Понятие сигнала. Классы и типы сигналов

Сигналы самых разнообразных типов широко используются в повседневной жизни, поэтому уже интуитивное понятие сигнала имеет довольно определенное содержание. Тем не менее это понятие стоит рассмотреть более подробно и дать определения, характеризующие сигнал с разных позиций и охватывающие все типы сигналов.

Сигнал является отображением *сообщения*; сигнал есть материальный носитель информации. Каков бы ни был любой конкретный сигнал – звуковой, световой или радиосигнал, книга, грампластинка или кинофильм, – весь смысл создания этого сигнала заключен в отображении определенной информации. В конечном счете всякая информация, а следовательно, и всякий сигнал адресуются к получателю и представляют какую-то ценность только при наличии (или возможном наличии) получателя. Отправитель и получатель всегда разделены пространством или временем; сигналы обеспечивают общение между ними. Отсюда следует дополнение (или, скорее, пояснение) к данному выше определению: *сигнал* есть средство перенесения информации в пространстве и времени.

Данные выше определения не могут служить основой для теории структуры сигналов, так как они рассматривают сигнал с его служебной стороны и не связаны со строением сигнала. Бесконечное

разнообразии сигналов, эквивалентность физически совершенно различных представлений одного сообщения – все это требует дать определение, отвечающее на вопрос: «Что такое сигнал?», т.е. определение, рассматривающее сигнал с точки зрения лица, интересующегося сигналом не как вспомогательным средством, а как объектом исследования.

Рассмотрение любых ситуаций, в которых участвуют сигналы, приводит к выводу о том, что хотя сигнал всегда связан с материальным объектом, большинство конкретных (физических, химических и пр.) свойств этого объекта несущественно. В конечном счете не важно, на какого сорта бумаге и какого состава чернилами написано данное письмо; от всех других писем оно отличается как сигнал состоянием распределения цвета по поверхности листа.

При осуществлении радиопередачи для отображения сообщения используется целый ряд физически различных объектов: машинописный текст передачи – голос диктора – электромагнитные волны – колебания тока в обмотке электромагнита – звук громкоговорителя – колебания барабанной перепонки слушателя – колебательные процессы в слуховом нерве слушателя. В качестве звеньев этой цепи можно включить запись и воспроизведение звука на магнитофоне и т.д. Общее, что связывает такое многообразие объектов, заключается в том, что все они служат для образования сигналов. В известном смысле можно сказать, что эти объекты сами «служат в качестве сигналов», однако более существенно то, что один и тот же объект (например, электромагнитное поле) может нести разные сигналы. Следовательно, в качестве сигналов используются не сами по себе объекты, а их состояния. Образование сигнала заключается в изменении состояния объекта. Это утверждение требует развития, так как, очевидно, обратное неверно: не всякое изменение состояния объекта является сигналом. Воздействие на объект, изменяющее его состояние, только тогда приведет к образованию сигнала, когда это воздействие производится по определенным правилам. Наличие таких правил обеспечивает соответствие между сообщением и сигналом. Существование этого соответствия, в свою очередь, обеспечивает возможность извлечения сообщения из полученного сигнала. Эта возможность может быть реализована только в том случае, если правила изменения состояния объекта (т.е. правила образования сигнала) известны стороне, получившей сигнал, или известны час-

точно, по крайней мере, до такой степени, чтобы, опираясь на эти частичные сведения и анализ сигнала, полностью определить эти правила. Теперь мы можем дать уточненное определение: **сигнал** – это изменение состояния материального объекта, произведенное по заранее определенным правилам (т.е. с помощью заранее определенного кода) [1].

Поскольку сигналы служат для переноса информации в пространстве и времени, то для образования сигналов могут использоваться только такие объекты, состояния которых обладают достаточной устойчивостью по отношению к изменению времени или положения в пространстве. Количественные требования к устойчивости предъявляются в соответствии с конкретными условиями использования сигнала.

С точки зрения устойчивости все сигналы можно разделить на два класса [Там же].

К первому классу относятся сигналы, в качестве которых используются устойчивые, стабильные состояния физических систем. Примерами сигналов такого типа могут служить: книга, фотографическое изображение, состояние пленки магнитофона, состояние ферритовой матрицы памяти электронной вычислительной машины, состояние регистра (системы триггеров) вычислительной машины, положение штанги железнодорожного семафора, расположение триангуляционной вышки и т.д. Такие сигналы назовем **статическими сигналами**.

Во втором классе объединяются сигналы, в качестве которых используются динамические состояния силовых полей. Как было указано в предыдущем параграфе, сигнал возникает при изменении состояния объекта. В отличие от других материальных систем поля характеризуются тем, что изменение их состояния не может быть локализовано в (неизолированной) части поля и приводит к распространению возмущения. При распространении возмущения в поле параметры конфигурации, строения этого возмущения обладают известной устойчивостью, что и позволяет использовать такие состояния поля в качестве сигналов. Примерами таких сигналов могут служить: звуковые сигналы (изменение состояния поля сил упругости в газе, жидкости или твердом теле), световые и радиосигналы (изменения состояния электромагнитного поля). Назовем сигналы второго класса **динамическими сигналами**.

В силу характерного различия динамических и статических сигналов их практическое использование тоже различно. Динамические сигналы используются преимущественно для передачи, а статические – для хранения информации. Однако эти функции нельзя полностью разделить. Динамические сигналы могут использоваться для хранения информации, как это имеет место, например, в запоминающих устройствах на ультразвуковых линиях задержки электронных цифровых вычислительных машин. В известном смысле можно сказать, что такие статические сигналы, как газеты и письма, в большей степени предназначены для передачи, чем для хранения информации.

Несмотря на огромное разнообразие сигналов, по способу их генерирования и извлечения из них сведений на приемном конце (т.е. по способу кодирования и декодирования) все сигналы разбиваются на три большие группы.

К первой группе относятся сигналы, которые можно назвать сигналами связи, или *прямыми сигналами*. К числу таких сигналов относятся сигналы, используемые в телеграфе, телефоне, телевидении, телеуправлении, акустической и световой связи, письменные и печатные буквенные сигналы и т.п. Характерные особенности этой группы сигналов состоят в том, что, во-первых, всегда налицо отправитель и получатель сигнала и сигнал предназначен для передачи информации от первого ко второму; во-вторых, код полностью известен обеим связующимся сторонам; в-третьих, в той части, которая не затрагивает условий существования сигнала, код является условным, т.е. строится по соглашению авизирующих сторон и по соглашению же может быть изменен.

Вторую группу образуют сигналы, с помощью которых производятся измерения – *сигналы для измерений*. Измерение некоторой величины есть сравнение ее с соответствующим эталоном, поэтому при измерении всегда имеются два сигнала: эталонный и сравниваемый с ним. В некоторых ситуациях (например, в радиолокации) подлежащий сравнению сигнал есть измененный в процессе распространения эталонный («зондирующий») сигнал; в других случаях (например, при измерении длины линейкой) сравниваемый сигнал существует независимо от эталонного. Особенность эталонного сигнала в том, что о нем все известно, и сам он, следовательно, никакой информации не несет; для удобства сравнения широкого класса сиг-

налов с эталоном последний обычно бывает периодическим, хотя это и не обязательно.

В третью группу могут быть отнесены так называемые *естественные сигналы*. Сигналы выступают всегда как состояния физических объектов. В определенном смысле можно сказать, что любое состояние любого физического объекта можно рассматривать как сигнал даже в том случае, если приведение этого объекта в данное состояние вовсе не связано с передачей каких-либо сведений, а произошло в силу естественных причин. Можно сказать, что перед нами «сигнал с не полностью известным кодом».

Сигнал всегда является функцией времени. В зависимости от того, какие значения могут принимать аргумент (время t) и уровни сигналов, их делят на 4 типа.

1. *Непрерывные, или аналоговые*, сигналы (рис. 1.1) определены для всех моментов времени и могут принимать все значения из заданного диапазона. Чаще всего физические процессы, порождающие сигналы, являются непрерывными. Этим и объясняется второе название сигналов данного типа – аналоговый, т.е. аналогичный порождающим процессам (случайные сигналы этого типа называются непрерывными случайными процессами).

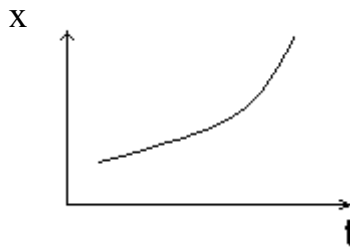


Рис. 1.1. Непрерывный, или аналоговый, сигнал

2. *Дискретизированные, или дискретно непрерывные*, сигналы (рис. 1.2) определены лишь в отдельные моменты времени и могут принимать любые значения уровня. Временной интервал Δt между соседними отсчетами называется шагом дискретизации. Часто такие сигналы называют дискретными по времени (случайные сигналы

этого типа называют процессами с дискретным временем или непрерывными случайными последовательностями).

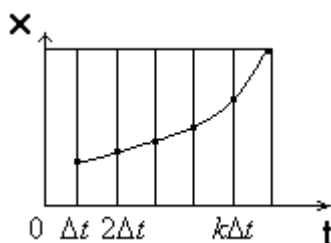


Рис. 1.2. Дискретизированный, или дискретно непрерывный, сигнал

3. **Дискретные по уровню, или квантованные,** сигналы (рис. 1.3) определены для всех моментов времени и принимают лишь разрешенные значения уровней, отделенные друг от друга на величину шага квантования $\Delta x = x_{k+1} - x_k$ (случайные сигналы этого типа называют дискретными случайными процессами).

Операция преобразования сигнала, при которой осуществляется дискретизация его по уровню или по времени или одновременно по уровню и времени, называется **квантованием**.

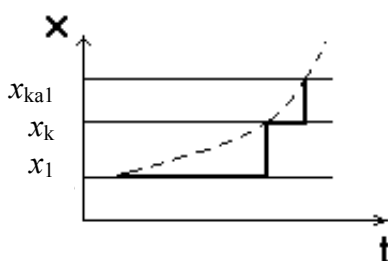


Рис. 1.3. Дискретные по уровню, или квантованные, сигналы

Квантование времени – преобразование сигнала в последовательность следующих друг за другом импульсов, амплитуда, дли-

тельность или частота которых зависят от амплитуды входного сигнала.

Квантование по уровню – преобразование сигнала, заключающееся в округлении мгновенного значения до некоторой ближайшей наперед заданной, фиксированной величины, называется уровнем.

4. **Дискретные по уровню и по времени** сигналы (рис. 1.4) определены в отдельные разрешенные моменты времени и могут принимать лишь разрешенные значения уровней (случайные сигналы этого типа называют дискретными случайными последовательностями).

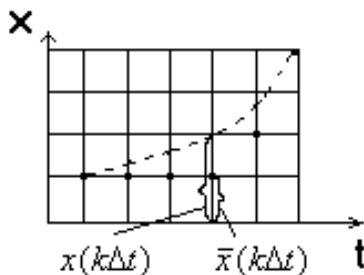


Рис. 1.4. Дискретные по уровню и по времени сигналы

Цифровая обработка сигналов (англ. digital signal processing, DSP), ЦОС, – преобразование сигналов, представленных в цифровой форме. Любой непрерывный (аналоговый) сигнал может быть подвергнут дискретизации по времени и квантованию по уровню (оцифровке), т.е. представлен в цифровой форме. Если частота дискретизации сигнала выше, чем удвоенная наивысшая частота в спектре сигнала F_{\max} , т.е. $F_d > 2 \cdot F_{\max}$, то полученный дискретный сигнал $s(k)$ эквивалентен сигналу $s(t)$ (см. теорему Котельникова) [1]. При помощи математических алгоритмов $s(k)$ преобразуется в некоторый другой сигнал $s_1(k)$, имеющий требуемые свойства. Процесс преобразования сигналов называется **фильтрацией**, а устройство, выполняющее фильтрацию, называется **фильтр**. Поскольку отсчеты сигналов поступают с постоянной скоростью F_d , фильтр должен успевать обрабатывать текущий отсчет до поступления следующего, т.е. обрабатывать сигнал в реальном времени. Для обра-

ботки сигналов (фильтрации) в реальном времени применяют специальные вычислительные устройства – цифровые сигнальные процессоры.

Различают методы обработки сигналов во временной и в частотной области. Эквивалентность частотно-временных преобразований однозначно определяется через преобразование Фурье.

Фильтры различают:

- непрерывные, дискретные, линейные и нелинейные;
- электрические, механические, акустические и др.

Основные задачи фильтрации:

– **линейная фильтрация** – селекция сигнала в частотной области; синтез фильтров, согласованных с сигналами; частотное разделение каналов; цифровые преобразователи Гильберта и дифференциаторы; корректоры характеристик каналов;

– **спектральный анализ** – обработка речевых, звуковых, сейсмических, гидроакустических сигналов; распознавание образов;

– **частотно-временной анализ** – компрессия изображений, гидро- и радиолокация, разнообразные задачи обнаружения;

– **адаптивная фильтрация** – обработка речи, изображений, распознавание образов, подавление шумов, адаптивные антенные решетки;

– **нелинейная обработка** – вычисление корреляций, медианная фильтрация; синтез амплитудных, фазовых, частотных детекторов, обработка речи, векторное кодирование;

– **многоскоростная обработка** – интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации в многоскоростных системах телекоммуникации, аудиосистемах.

1.4. Общая модель информационной системы

Всякая (искусственная или естественная) система взаимодействующих объектов может рассматриваться как **информационная система**. Любая часть совокупности взаимодействующих объектов (в частности, и один из объектов) может изучаться с целью извлечения информации о другой части этой совокупности (в частности, о другом отдельном объекте), так как взаимодействие обеспечивает соответствие состояний, т.е. отражение, содержание информации. Объ-

екты, образующие информационную систему, могут иметь совершенно произвольную природу [1].

Из этого, конечно, не следует, что теория информации призвана заменить или объять другие науки, изучающие специфические взаимодействия между объектами определенного класса. Но из этого следует, что среди бесконечного множества свойств, которые присущи любой системе взаимодействующих объектов, неотъемлемым свойством является свойство объектов отражать друг друга, содержать информацию друг о друге. В некоторых явлениях информационные отношения не играют существенной роли или замаскированы – тогда наука, изучающая эти явления, может достичь определенных успехов без привлечения теории информации; в других случаях информационный подход неизбежен.

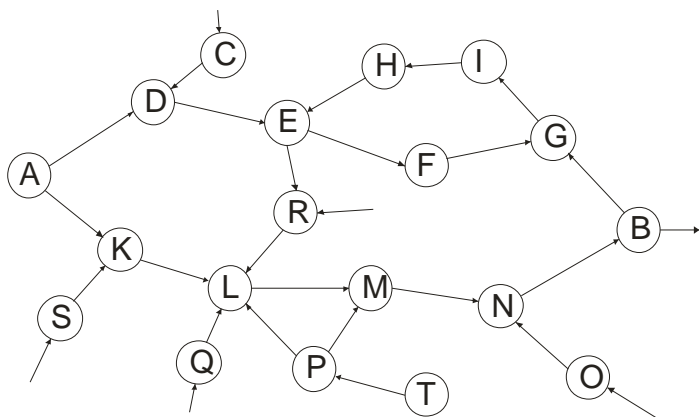


Рис. 1.5. Упрощённая схема систем объектов

Пусть мы имеем систему объектов произвольной природы, взаимосвязанных между собой. Из множества связей конкретного объекта с другими обычно можно выделить лишь несколько наиболее существенных, опустив из рассмотрения остальные. В этом случае некоторая сложная система объектов упрощенно может быть изображена подобно рис. 1.5.

Существенные связи между объектами изображены стрелками, направление которых соответствует переходу от причины к следст-

вию. Благодаря наличию непосредственных связей объект B , например, содержит информацию об объектах O, G, N ; связи через посредство других объектов обеспечивают содержание в объекте B информации об объектах A, R, S, O и др.

Обычно получателя интересует информация о каком-нибудь одном объекте, например A , и объект B наблюдается с целью извлечения именно этой информации. Информация об интересующем получателя объекте рассматривается как полезная, информация о других объектах предстает как ненужная, бесполезная и даже вредная, поскольку ее наличие может затруднить извлечение полезной информации. Если получатель не располагает исчерпывающей информацией об остальных объектах, их влияние должно рассматриваться как «помехи», или «шум». Таким образом, всякий раз, когда влияние не интересующего нас объекта нарушает однозначность соответствия состояний объектов A и B , говорят, что имеют место помехи. Соответствующие объекты (например, C, R, S, T, O, Q) считаются источниками помех.

Если объекты A и B не взаимодействуют непосредственно, то соответствие их состояний устанавливается благодаря наличию цепочек из промежуточных объектов. Таких связующих последовательностей объектов иногда может быть несколько (D, E, F, G и K, L, M, N на рис. 1.5); иногда лишь часть последовательности мультиплета (L, M и L, P, M). В этих случаях говорят о многоканальных, многолучевых или многопутевых системах.

Наконец, в структуре информационной системы могут существовать замкнутые последовательности объектов, несущие полезную информацию (например, E, F, G, I на рис. 1.5). Такие системы обычно называют системами с петлями обратной связи. Петли обратных связей могут охватывать как несколько промежуточных объектов («внутренние» петли), так и целиком всю систему, соединяя конечный и начальный объекты («внешние» петли).

Итак, во всякой информационной системе могут быть различены объекты следующих четырех типов:

1. Начальный объект. Вся остальная система используется для получения информации именно об этом объекте. Начальный объект часто называют источником информации.

2. Конечный объект. Зная закон соответствия состояний начального и конечного объектов и непосредственно наблюдая последний, получатель извлекает информацию о состоянии первого.

3. Промежуточные, вспомогательные объекты. С помощью этих объектов устанавливается соответствие между начальным и конечным объектами.

4. Объекты, взаимодействие с которыми разрушает однозначность соответствия состояний начального и конечного объектов; источники помех.

Следует указать, что иногда разделение указанных типов объектов может быть осуществлено лишь условно. Простейший пример – реальный усилитель; по существу являясь объектом третьего типа, он одновременно является источником тепловых шумов. Другой пример – линия связи на тропосферном рассеянии. С одной стороны, наличие неоднородностей тропосферы обеспечивает само существование связи на расстоянии, с другой – хаотические движения тех же неоднородностей вызывают неконтролируемые замирания сигнала, затрудняющие связь. Однако для удобства рассмотрения даже такие системы искусственно изображаются в виде эквивалентной комбинации объектов указанных четырех типов.

Подчеркнем еще раз, что одна и та же реально существующая информационная система может быть качественно различной для двух наблюдателей, обладающих различной информацией об этой системе. Для того чтобы извлечь информацию об объекте A , наблюдая объект B , необходимо знать закон соответствия их состояний. Если наблюдатель не знает этого закона, наблюдение объекта не может непосредственно дать ему нужной информации, вся система оказывается для него в качественно ином состоянии, нежели для наблюдателя, знающего этот закон. Чтобы убедиться в реальности такой ситуации, достаточно представить себе терпящую бедствие радиофицированную яхту, на которой после гибели радиста не оказалось людей, знакомых с азбукой Морзе. Другим примером может служить читатель, разглядывающий книгу, написанную на незнакомом языке.

Вопрос о классификации информационных систем по их функциональному назначению или использованию нельзя считать достаточно полно рассмотренным: существует множество тонких различий между такими системами. Однако несколько типов информаци-

онных систем различаются вполне четко: 1) системы связи, или системы передачи информации, 2) системы хранения информации, 3) системы обработки (преобразования) информации, 4) системы измерения, 5) системы наблюдения или исследования.

1.4.1. Системы связи

Системами связи называются информационные системы, основной функцией которых является перенос информации в пространстве [1–3].

Существует много разновидностей систем связи, к ним относятся почта и радиовещание, телефон и телеграф, акустические системы связи и сигнальная веревка водолазов и т.д. Особого рассмотрения заслуживают технические системы связи, в которых для переноса информации из одного пункта в другой используются динамические сигналы. Для возбуждения динамического сигнала создается специальная передающая система, а для регистрации сигнала в пункте назначения – приемная система. Совокупность объектов, связывающих передающую и приемную системы, называется **линией связи**. Например, в телефонной связи линия представляет собой пару проводов, в радиосвязи линией связи является пространство, в котором распространяются радиоволны.

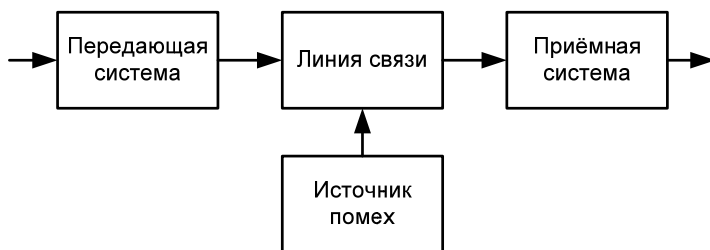


Рис. 1.6. Блок-схема канала связи

При необходимости описания потенциальных возможностей системы связи можно условиться не учитывать конкретные особенности отправителя и получателя. В этом случае начальным

объектом в системе связи считается входное устройство передающей системы, а конечным объектом – выходной сигнал приемной системы.

Рассмотрим некоторые разновидности технических систем связи, работающих с динамическими сигналами.

1. **Одноканальная система связи.** Систему связи, предназначенную для односторонней передачи информации между двумя заданными пунктами, будем называть **одноканальной системой** или просто **каналом связи**. Простейшая блок-схема канала связи приведена на рис. 1.6 и содержит, кроме передающей и приемной систем и линии связи, источники помех, действующих в общем случае на все элементы системы. Помехи, возникающие (или создаваемые искусственно) в линии связи, называются **внешними** (в радиосвязи к их числу относятся, например, промышленные помехи, атмосферные и космические шумы, помехи от посторонних радиосредств и т.п.). Под **внутренними помехами** обычно понимают шумы, возникающие в передающей и приемной системах (тепловые шумы сопротивлений, шумы электронных ламп и пр.). При некоторых условиях иногда оказывается возможным пренебречь влиянием помех; такая система связи называется **каналом без помех**. В других случаях исключить из рассмотрения помехи нельзя. Обычно, однако, считается, что внутренними шумами можно либо пренебречь по сравнению с внешними, либо что система допускает «пересчет» всех источников в один эквивалентный с известными характеристиками, и этот источник помех выносится в линию связи. Целесообразно различать каналы связи, работающие на непрерывных и дискретных сигналах. Имеется в виду дискретность канала в том смысле, что множества элементарных символов на входе и выходе линии связи дискретны и конечны. Проблемы, возникающие при рассмотрении дискретных каналов связи, можно проиллюстрировать с помощью схемы на рис. 1.7. От общей схемы (см. рис. 1.6) она отличается детализацией и передающей, и приемной систем: передающая система представлена двумя кодирующими, а приемная – двумя декодирующими устройствами.

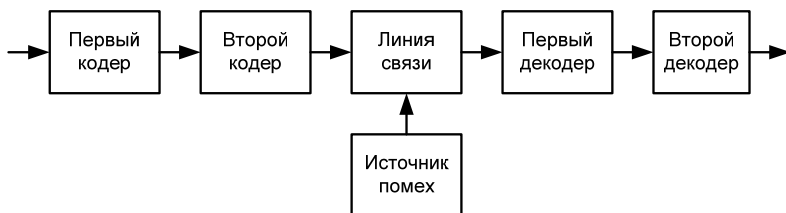


Рис. 1.7. Проблемы, возникающие при рассмотрении дискретных каналов связи

Входным сигналом системы связи могут служить печатный текст или графическое изображение, звуковая волна, показания прибора и т.п. Назначение первого кодирующего устройства состоит в том, чтобы представить входной сигнал в некоторой стандартной форме, например в виде последовательности двоичных символов. Основная проблема такого перекодирования заключается в том, чтобы стандартное представление было наиболее экономичным, т.е. требовало бы (в среднем) наименьшего возможного числа двоичных символов.

Из-за наличия помех в линии связи соответствие между отправленным и принимаемым символами перестает быть однозначным. В общем случае попытки определить по принятому символу, какой из возможных символов был отправлен, неизбежно связаны с ошибками. Однако имеется возможность ослабления влияния помех с помощью подходящего перекодирования сигнала. В простейшем случае такую возможность можно реализовать с помощью многократного повторения передачи и последующего сличения полученных текстов. Такой метод, однако, применим лишь при малых вероятностях ошибок и, кроме того, резко увеличивает необходимое время передачи. Существуют способы более эффективного кодирования. Назначение второго кодирующего устройства и первого декодирующего устройства и заключается в реализации избранного метода помехоустойчивого кодирования и декодирования сигнала. Главная проблема при этом состоит в том, чтобы максимально снизить вероятность ошибок, хотя помехи случайным образом искажают полезный сигнал. В идеальном случае выходной сигнал первого кодирующего устройства совпадает с входным сигналом второго декодирующего устройства. Итак, функция вто-

рого кодирующего устройства состоит в представлении стандартной последовательности символов в избранном коде, а первое декодирующее устройство по принятой последовательности восстанавливает сигнал снова в стандартной форме.

Наконец, функция второго декодирующего устройства сводится к восстановлению входного сигнала всей системы; при этом считается, что стандартное представление сигнала было безошибочно определено первым декодирующим устройством.

2. **Многоканальная система связи.** Довольно часто возникает необходимость передачи информации от группы близких источников к группе получателей, сосредоточенных в другом пункте. Наглядным примером может служить необходимость передачи данных от различных приборов, установленных на искусственном спутнике, на группу наземных регистрирующих устройств. Другим примером может служить телефонная связь между двумя крупными городами. С одной стороны, необходимо создать для каждой пары отправитель–получатель отдельный канал связи. С другой стороны, экономические соображения (например, высокая стоимость сооружения проводной линии связи) или технические трудности (которые возникли бы, например, при создании отдельной линии связи для каждого прибора на спутнике) препятствуют увеличению числа отдельных линий связи для каждой пары связываемых объектов. Выход состоит в том, чтобы объединить каналы, направив всю информацию по одной линии связи (если, конечно, она допускает это). Такие комбинированные системы связи и называются **многоканальными**.

Для того чтобы сигнал, адресуемый конкретному получателю, поступал только к нему, необходимо, очевидно, снабдить сигналы различных каналов некоторым дополнительным физическим признаком, параметром отбора, по которому на приемном конце и производилась бы фильтрация. Поэтому в многоканальной системе связи появляются дополнительно устройства для разделения сигналов, принадлежащих разным каналам. Для многоканальных систем специфической особенностью является то, что в результате неидеальности разделения сигналы соседних каналов несколько искажают сигнал данного канала; эти так называемые перекрестные помехи обычно являются основным видом помех в таких системах.

3. **Многопутевые (многолучевые) каналы связи.** В ряде случаев приходится пользоваться такими каналами связи, сигнал в которых

по некоторым физическим причинам расщепляется на несколько компонент. При этом каждая из компонент сигнала следует по отдельному пути, претерпевая специфические для этого пути преобразования (изменения, задержку во времени, а иногда и нелинейные искажения). Если бы удавалось на приемном конце разделить сигналы, пришедшие по разным путям, то мы имели бы одну из рассмотренных выше систем связи. Однако часто такой возможности не имеется, и приемник фиксирует сигнал, являющийся результатом некоторого суммарного воздействия компонент, пришедших по разным путям. Такие системы связи принято называть *многопутевыми* (многолучевыми).

Примером многолучевой системы связи может служить радиосвязь на коротких волнах, которые распространяются путем земной волны и путем отражения от ионосферы (иногда претерпевая многократное отражение от ионосферы и поверхности Земли). Другой пример – радиосвязь на рассеянии, при которой неоднородности тропосферы или ионосферы могут рассматриваться как отдельные рассеивающие центры, излучающие отдельные компоненты сигнала.

4. Системы связи со случайными параметрами. Основные трудности при рассмотрении многопутевых каналов возникают не столько в связи с необходимостью учета соотношений между компонентами сигнала, сколько в связи с тем, что необходимо учитывать временные изменения условий прохождения компонент по различным путям. Эти изменения обычно носят случайный характер, что и вызывает ряд затруднений. Для преодоления этих трудностей удобным средством оказалось построение модели системы связи со случайными параметрами.

В некоторых случаях к рассмотрению многопутевых каналов со случайным изменением параметров компонент сигнала можно подойти чисто феноменологически: рассматривать всю систему как одноканальную, однопутевую, а все вероятностные свойства отнести к случайному изменению некоторых воображаемых параметров такого канала. Подобная модель оказывается полезной не только при рассмотрении многолучевых систем связи; существуют системы, которые непосредственно отображаются такой моделью (например, связь на метеорных следах), что делает ее изучение еще более важным.

5. Сложные системы связи. Для некоторых целей приходится сооружать комплексные системы связи: дублировать каналы для

повышения надежности связи; передавать, информацию по последовательности каналов с различными свойствами; сооружать сети со сложным переплетением каналов и т.п. Такие составные системы связи будем называть сложными. Сложные системы связи обладают рядом специфических особенностей, которые должны учитываться при построении и использовании.

1.4.2. Системы хранения информации

В подавляющем большинстве практических ситуаций информация, имеющаяся к моменту времени t , не может или не должна использоваться немедленно; но обычно есть уверенность, что эта информация потребуется в дальнейшем. Для обеспечения переноса информации во времени и создаются разнообразные системы хранения информации. Примерами таких систем могут служить магнитофон и записная книжка, библиотека и запоминающие устройства персональных компьютеров, атлас географических карт, картинная галерея, таблицы функций и т.д.

Для технических систем хранения информации (которые и представляют основной интерес при теоретико-информационном подходе) главными характеристиками являются информационная емкость (т.е. максимальное количество информации, которое способна хранить система) и долговременность хранения информации без потерь (или с потерями, не превышающими допустимых пределов). При рассмотрении быстродействующих систем, в которые входят запоминающие устройства, важным параметром является время выборки, т.е. промежуток времени между моментом обращения к памяти и моментом получения нужной информации.

Разнообразие систем хранения информации очень велико, даже если не вдаваться в технические отличия между конкретными системами. Различают (по длительности хранения) долговременные и оперативные запоминающие устройства (ЗУ); имеются ЗУ, к которым можно обращаться сколько угодно раз, но есть ЗУ, хранящие информацию лишь до первого обращения к ним. Существуют ЗУ, допускающие обращение к ним лишь в фиксированные моменты времени (обычно периодически повторяющиеся); имеются ЗУ, к которым можно обращаться в произвольные моменты времени.

При всем многообразии систем хранения информации в них

можно выделить несколько основных подсистем с различным функциональным назначением. Кроме собственно хранилища информации, имеется адресная система, обеспечивающая поиск по ряду признаков нужной ячейки хранилища; входные и выходные блоки обеспечивают возможность запроса и выдачи данных, а также занесения новой информации как путем вытеснения ненужной, так и путем заполнения свободных ячеек.

Введение запоминающих устройств в сложные информационные системы значительно расширяет возможности последних и, конечно, значительно увеличивает трудности их исследования. Поэтому системы с памятью и системы без памяти обычно рассматриваются обособленно.

1.4.3. Преобразователи информации

Всевозможные операции, происходящие в информационных системах, не сводятся лишь к передаче и хранению информации. Во многих системах самым существенным является переработка информации, иногда простая, иногда весьма сложная. Для такой переработки служат специальные устройства – преобразователи информации. Преобразование информации ставит ряд сложных проблем, лишь часть из которых разрешена теорией информации в достаточной степени полно [1–3].

К числу относительно простых и в то же время наиболее часто встречающихся преобразований относится перекодирование. Мы уже имели возможность обсудить функционирование кодирующих и декодирующих устройств, входящих в состав систем связи (см. п. 1.4.1). По существу перекодирование является операцией перехода от представления некоторой информации в одном коде к представлению ее в другом коде (под кодом понимается вся совокупность правил образования сигнала). Это высказывание, будучи верным, носит слишком общий характер и требует уточнения. Будем называть перекодированием такое преобразование одного сигнала в другой, при котором количество информации, несомое вторым сигналом, равно количеству информации, несомому первым. Это, конечно, не означает, что и каждый элемент вторичного сигнала несет ту же нагрузку, что и элемент первичного сигнала. Перекодирование

может осуществляться так, что один сигнал будет содержать большее число элементов, чем другой.

По принципу действия все кодирующие устройства можно разбить на **два** класса. К первому относятся кодирующие устройства без памяти, которые осуществляют перекодирование сигнала поэлементно, или мгновенно. Более сложным для изучения объектом являются кодирующие устройства с памятью. Их особенность состоит в том, что каждый элемент выходного сигнала устройства определяется в общем случае не одним элементом входного сигнала, а некоторым множеством таких элементов. Примерами таких устройств служат устройства, осуществляющие оптимальное кодирование для передачи сигнала по каналу с шумами, устройства для передачи секретными кодами (исключая простейшие коды), а также фильтры с конечной полосой пропускания и т.п.

К числу преобразователей информации, тоже сравнительно подробно изученных, относятся накопители информации. Неотъемлемой частью накопления информации является ее запоминание, поэтому иногда запоминающие устройства рассматривают как накопители. Однако накопление может (или должно) иногда производиться не путем запоминания всех входных сигналов, а путем запоминания результата некоторой обработки этих сигналов. Накопителем является, например, сумматор, по выходному сигналу которого нельзя однозначно определить слагаемые. Накопителем является прибор, выдающий по входной реализации случайного процесса его гистограмму. Цель, с которой создаются накопители, – накопление нужной информации. Если вся поступающая информация нужна, то накопитель является просто хранителем информации, запоминающим устройством. Если же входные сигналы несут не только полезную информацию, но и ненужную, то накопитель играет роль фильтра, отбирающего и накапливающего только то, что необходимо для дальнейшего использования; в этом случае накопление не сводится к простому запоминанию.

Перечисляя типичные системы преобразования информации, следует упомянуть сравнивающие устройства, устанавливающие степень сходства сравниваемых сигналов; решающие устройства, т.е. системы, отображающие пространство входных сигналов на пространство решений (управляющих сигналов); квантующие устройства, ставящие в соответствие непрерывным сигналам их дис-

кретные отображения; фильтры, осуществляющие отбор сигналов по некоторым признакам, и целый ряд других систем обработки информации. С каждой из таких систем связан ряд информационных проблем; в первую очередь – вопрос об оптимальности работы таких систем в смысле минимальных потерь полезной информации (или в некотором близком к этому смысле).

1.4.4. Другие типы информационных систем

Многообразие информационных систем весьма велико, и, видимо, вопросы их классификации еще будут обсуждаться в научной литературе. Кроме рассмотренных выше трех типов информационных систем, можно различить еще несколько характерных групп систем, из которых кратко обсудим системы измерения и системы исследования.

Основные особенности систем измерения связаны с особенностями измерительных сигналов. В состав системы измерения входят: генераторы зондирующих и эталонных сигналов; линии связи, по которым сигналы подаются и отводятся от объекта измерения; система сравнения сигнала от измеряемого объекта с эталоном. Основными проблемами при проектировании систем измерения являются: выбор наиболее информативных сигналов; уменьшение шумов (погрешностей измерения), т.е. доведение до возможного минимума влияния неконтролируемых изменений, не интересующих нас объектов; отыскание таких способов обработки данных, которые позволили бы извлекать максимум наличной информации.

Системы исследования создаются для приема и расшифровки сигналов, код которых не полностью известен. К числу таких систем относятся устройства для приема и извлечения информации из естественных сигналов, системы, создаваемые для перехвата и расшифровки радиogramм противника, закодированных секретным «разгадоустойчивым» кодом, и т.п. Одним из основных моментов в работе таких систем является выдвижение и проверка гипотез относительно неизвестного кода. Эта процедура ставит весьма сложные проблемы. Ведь если относительно неизвестного кода может быть выдвинуто очень большое число гипотез, то простой перебор их становится бесперспективным делом. Возникает задача отбора «наиболее правдоподобных» гипотез, решение которой опирается на сравнительную оценку правдоподобно-

сти гипотез. Введение этой оценки – далеко не тривиальное дело. Естественно, что чем больше информации учитывает та или иная оценка, тем эффективнее становится процедура исследования. Приложение теории информации к исследованию таких систем представляется вполне оправданным.

Заканчивая обсуждение типов информационных систем, отметим еще раз, что часто на практике встречаются системы, которые нельзя однозначно отнести к какому-либо из указанных типов. Такие системы представляют собой сложный комплекс, в который входят каналы связи, системы переработки и хранения информации и другие устройства. Примером может служить универсальная цифровая вычислительная машина. Еще более сложный комплекс представляет собой, например, система управления запуском спутника Земли. Такие сложные системы могут рассматриваться и по частям, но ряд вопросов (особенно некоторые вопросы оптимальности) должен иногда решаться с учетом взаимодействия всех частей.

Укажем также на весьма мало исследованный и очень перспективный класс информационных систем, характеристики которых изменяются в ходе работы систем таким образом, что свойства системы в целом улучшаются (в некотором смысле); это так называемые самонастраивающиеся, или самоорганизующиеся, системы.

1.5. Классификация информационных систем

Напомним, что информационными системами называют совокупность взаимосвязанных средств, которые осуществляют передачу, хранение и обработку информации, их также называют информационно-вычислительными системами. В информационную систему данные поступают от источника информации. Эти данные отправляются на хранение либо претерпевают в системе некоторую обработку и затем передаются потребителю.

Между потребителем и собственно информационной системой может быть установлена обратная связь. В этом случае информационная система называется замкнутой. Канал обратной связи необходим, когда нужно учесть реакцию потребителя на полученную информацию.

Информационная система состоит из источника информации, аппаратной части ИС, программной части ИС, потребителя информации.

Различают 3 класса информационных систем, используемых в мехатронике, по степени их автоматизации:

Автоматические информационные системы – выполняют все операции по переработке информации без участия человека; различные роботы. Примером автоматических информационных систем являются некоторые поисковые серверы Интернет, например Google, где сбор информации о сайтах осуществляется автоматически поисковым роботом и человеческий фактор не влияет на ранжирование результатов поиска.

Ручные информационные системы – характеризуются отсутствием современных технических средств переработки информации и выполнением всех операций человеком.

Автоматизированные информационные системы (АИС) – наиболее популярный класс ИС. Предполагают участие в процессе обработки информации и человека, и технических средств, причем главная роль отводится компьютеру.

АИС представляет собой совокупность программно-аппаратных средств, предназначенных для автоматизации деятельности, связанной с хранением, передачей и обработкой информации.

АИС являются, с одной стороны, разновидностью информационных систем (ИС), с другой – автоматизированных систем (АС), вследствие чего их часто называют ИС или АС.

В АИС за хранение информации отвечают: на физическом уровне – встроенные устройства памяти (RAM), внешние накопители, дисковые массивы, на программном уровне – файловая система ОС, системы хранения документов, мультимедиа и т.д.

Какая-либо однозначная и общепринятая классификация АИС отсутствует, однако в науке и промышленности, по крайней мере, выделяют следующие типы систем по назначению [2, 3]:

АСУ – автоматизированные системы управления;

АСУП – автоматизированные системы управления предприятия;

АСКУЭ – автоматизированные системы контроля и учёта энергоресурсов;

АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами;

ГИС – геоинформационные системы;
ИУС – информационно-управляющие системы;
ИИС – информационно-измерительные системы;
ИИС – интеллектуальные информационные системы;
ИПС – информационно-поисковые системы;
ИСС – информационно-справочные системы;
ЛИС – лабораторная информационная система;
РИС – распределенная информационная система;
САПР – системы автоматизации проектной деятельности;
СИИ – системы искусственного интеллекта;
СКД, СКУД – системы контроля (и управления) доступом;
СПД – системы передачи данных.

Тесты к главе 1

1. Что понимают под «информацией» в области техники?
 - а) Часть знаний, которая используется для ориентирования, активного действия, управления.
 - б) Любые данные или сведения, которые кого-либо интересуют.
 - в) Сообщения, передаваемые в форме знаков или сигналов.

2. Тип сигнала, принимающий любые значения уровня, но в отдельные моменты времени:
 - а) Дискретно непрерывный.
 - б) Квантованный.
 - в) Аналоговый.

3. Объекты, взаимодействие с которыми разрушает однозначность соответствия состояний начального и конечного объектов:
 - а) Декодер.
 - б) Промежуточные, вспомогательные объекты.
 - в) Источники помех.

4. Селекция сигнала в частотной области; синтез фильтров, согласованных с сигналами; частотное разделение каналов:
 - а) Спектральный анализ.
 - б) Линейная фильтрация.
 - в) Нелинейная обработка.

5. Информационные системы, основной функцией которых является перенос информации в пространстве:

- а) Системы обработки информации.
 - б) Системы измерения.
 - в) Системы связи.
6. К внешним помехам относятся:
- а) Шумы электронных ламп.
 - б) Космические шумы.
 - в) Тепловые шумы сопротивлений.
7. Система связи, предназначенная для односторонней передачи информации между двумя заданными пунктами:
- а) Одноканальная.
 - б) Многопутевая.
 - в) Многоканальная.
8. Для положительного числа данный код совпадает с прямым. Для отрицательного числа все цифры числа заменяются на противоположные, а в знаковый разряд заносится единица:
- а) Дополнительный.
 - б) Неравномерный.
 - в) Обратный.
9. Для технических систем хранения информации главными характеристиками являются:
- а) Быстродействие.
 - б) Емкость.
 - в) Способ обращения.
10. Существуют ли ЗУ, обращение к которым может производиться лишь в фиксированные моменты времени?
- а) Да.
 - б) Нет.
11. На сколько классов можно разбить все кодирующие устройства по принципу действия?
- а) Три.
 - б) Пять.
 - в) Два.
12. Неотъемлемой частью накопления информации является ее:
- а) Преобразование.
 - б) Запоминание.
 - в) Отправление.

13. Сравнивающие устройства – это устройства, устанавливающие степень сходства сравниваемых сигналов:

- а) Да.
- б) Нет.

14. В системах исследования код:

- а) Не полностью известен.
- б) Известен полностью.
- в) Совсем неизвестен.

15. Автоматизированные информационные системы предполагают участие в процессе обработки информации:

- а) Человека.
- б) Компьютера.
- в) Человека и компьютера.

16. Датчики системы предназначены для сбора информации о состоянии внешней среды:

- а) Да.
- б) Нет.

17. Оснащенное рабочим органом механическое устройство, предназначенное для перемещения в пространстве тела, – это:

- а) Промышленный робот.
- б) Манипулятор.
- в) Информационная система.

18. Сколько известно различных элементарных сочленений?

- а) Два.
- б) Десять.
- в) Шесть.

19. Звенья и сочленения манипулятора нумеруются:

- а) По возрастанию от стойки к схвату.
- б) По возрастанию от схвата к стойке.
- в) Произвольный порядок.

20. Механический манипулятор состоит из звеньев, соединенных только вращательными сочленениями:

- а) Да.
- б) Нет.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Дайте определение информационной системы.
2. Назовите четыре типа объектов информационных систем.
3. Дайте определение системам связи.
4. Какие главные характеристики определяют системы хранения информации?
5. Дайте классификацию информационным системам, используемым в мехатронике.
6. Назовите три класса ИС, различаемых по степени автоматизации.
7. Что такое сигнал?
8. Назовите два основных класса сигналов.
9. Какие сигналы относятся к типу прямых?
10. Назовите основные свойства информации.
11. Дайте определение квантования сигнала по уровню / времени.
12. В чём заключается суть кодирования?
13. Какие виды фильтров вы знаете?
14. Расскажите о методах и средствах передачи информации.
15. Какие пункты включает в себя внутренняя подсистема в промышленных роботах?
16. Из чего состоит внешняя подсистема промышленных роботов?
17. Дайте определение манипулятору.
18. Назовите элементарные сочленения.
19. С помощью чего информационная система собирает данные о состоянии внешней среды? Примеры.
20. Как нумеруются звенья и сочленения манипулятора?

Список литературы к главе 1

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 477 с.
2. Энциклопедия кибернетики. Киев: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. Т. 1. 608 с.
3. Энциклопедия кибернетики. Киев: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. Т. 2. 624 с.
4. Попов Э.В., Фридман Г.Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1976. 456 с.

Глава 2. ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ

2.1. Введение

Большое значение при разработке информационных систем имеет правильный выбор устройств, используемых в ее подсистемах. В данной главе рассмотрены вопросы выбора основных устройств осветителей рабочей зоны, оптико-электронные приемники излучения, видеопроцессоры и датчики осязания роботов в ближней зоне; даны рекомендации по применению этих устройств в ИС.

2.2. Осветители рабочей зоны

Освещение существенно влияет на качество работы СТЗ. При тщательно подобранном искусственном освещении характерные особенности объекта манипулирования становятся более заметными, а шумовая составляющая изображения, в том числе теневая, снижается, что повышает быстрдействие работы СТЗ за счет упрощения процедур фильтрации ТИ. Однако важно подобрать средства освещения рабочей зоны робота не только по их физическим параметрам, но и оптимизировать такие их характеристики, как стоимость, надежность, средний срок службы.

Различают три способа искусственного освещения: общий, местный и комбинированный. При общем способе освещения один или несколько источников света освещают значительную площадь, включая рабочую зону, находящуюся в поле зрения робота. При местном – один или группа источников света освещают в основном поле зрения робота. Комбинированный способ реализуется одновременным использованием общего и местного способов искусственного освещения [1].

Освещаются производственные помещения общим или комбинированным способом. Для первого способа характерно то, что искусственное освещение помещения в целом (и одновременно

объектов в нем) осуществляется источниками, расположенными равномерно или локализованно в верхней части помещения. Общее освещение имеет следующие недостатки: а) наличие теней от конструктивных элементов оборудования, расположенных между светильниками и рабочей зоной робота, б) высокие энергетические затраты для создания требуемого уровня освещенности в рабочей зоне СТЗ. Второй способ, представляющий собой комбинацию общего и местного освещения, лишен перечисленных недостатков.

Основным требованием, предъявляемым к средствам освещения, является обеспечение необходимого контраста C между двумя областями a и b на изображении:

$$C = \frac{L_a - L_b}{L_a + L_b}, \quad (2.1)$$

где L_a, L_b определяются по формуле $L = \int r dE$; r – коэффициент отражения; dE – элемент светового потока. Коэффициент отражения, как правило, представляет собой функцию трех углов – между нормалью к освещаемой поверхности и направлением на источник света, между нормалью к поверхности и направлением на наблюдателя и между направлением на источник света и направлением на наблюдателя. Кроме того, известно, что коэффициент отражения имеет сильную частотную зависимость, поэтому подбор спектральных характеристик источника освещения и использование поляризованного когерентного падающего света часто обеспечивают повышение контраста.

Специфичны оптические системы лазерных осветительных систем. В зависимости от назначения и принципа работы когерентной СТЗ такие системы могут фокусировать лазерные пучки на постоянном или переменном расстояниях, коллимировать их, изменять диаграмму направленности. Оптические элементы, применяемые в лазерных системах (линзы, пластинки, призмы и т.д.), принципиально ничем не отличаются от элементов систем с некогерентными излучателями. В то же время при их выборе и расчете следует учитывать ряд особенностей: монохроматичность лазерного излучения, его поляризованность, узкую диаграмму направленности и др.

Например, при контроле печатных плат необходимо обеспечить постоянство контраста между текстолитовой основой и проводниками на ней независимо от степени окисления. Это достигается использованием специального оптического полосового фильтра с полосой пропускания, примерно одинаково охватывающей спектральные области для чистой и окисленной меди. Однако применение полосового фильтра снижает интенсивность проходящего света, что приводит к повышению мощности источника света.

К числу основных схем компоновки осветительных систем относятся: 1) однорядные и многорядные схемы, дополненные конструктивными диффузными отражательными элементами (потолок, стены помещения, плоскости оборудования), формирующие ненаправленную равномерно распределенную освещенность рабочей области СТЗ; 2) схемы с одиночной осветительной системой, оптическая ось которой параллельна оптической оси видеосенсора или совпадает с ней (бестеневая схема), и схемы «на просвет»; 3) схемы с различно ориентированными оптическими осями видеосенсора и осветительной системы (теневые схемы); 4) сканирующие схемы с подвижной оптической осью осветительной системы; 5) схемы катетерного типа для осмотра недоступных для прямого дистанционного наблюдения частей объектов. Возможны смешанные схемы компоновки осветительных систем для одновременной реализации нескольких функций.

В зависимости от решаемой функциональной задачи осветительная система размещается вне конструктивных элементов робота и СТЗ, на специальном неподвижном или подвижном элементе, связанном с роботом, а также на охвате робота.

Известны четыре базовые схемы осветительных систем. Первая схема (диффузионное переднее освещение) используется (рис. 2.1) при работе с объектами, имеющими зафиксированные поверхности (рис. 2.1, *а*). Вторая схема осветительной системы (заднее освещение объекта коллимированным источником) применяется в случае, если силуэты объекта достаточно четки для его непосредственного анализа (рис. 2.1, *б*). Третья схема освещения представляет собой пространственно модулированный источник света (рис. 2.1, *в*). При данном методе используются специальные точки и линии на исследуемом объекте для получения его характеристик. Изгибы и неровности объекта искривляют направление световых лучей. По искрив-

ленным лучам получают изображения и определяется конфигурация объекта. При этом изображении могут быть потеряны некоторые грани и ребра предмета. Для исключения этого применяют добавочные точечные источники света, позволяющие формировать «пропущенные грани» и ребра объекта. Четвертая базовая схема осветительных систем использует направленный свет для изучения неровных поверхностей (рис. 2.1, г). С помощью таких источников можно определить трещины и дефекты поверхности. При отсутствии дефектов на поверхности только незначительная часть света попадает в камеру. При наличии же дефектов поток лучей, поступающих в камеру, увеличивается, указывая на трещину либо на другой дефект. Наиболее часто используемые конструктивные схемы размещения осветителей относительно рабочей зоны робота приведены на рис. 2.2.

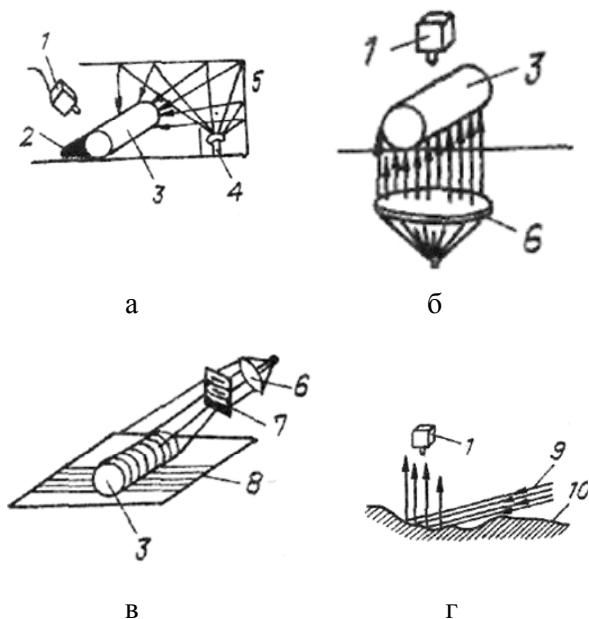


Рис. 2.1. Типовые схемы базовых осветительных систем

Итак, осветительная система обеспечивает адаптацию СТЗ. В общем случае осветительная система должна содержать блок управления (БУ), источник света (ИС), фильтр (Ф). При этом БУ управляет как положением и мощностью излучения ИС, так и параметрами Ф, обеспечивающими требуемую освещенность объекта манипулирования ОМ.

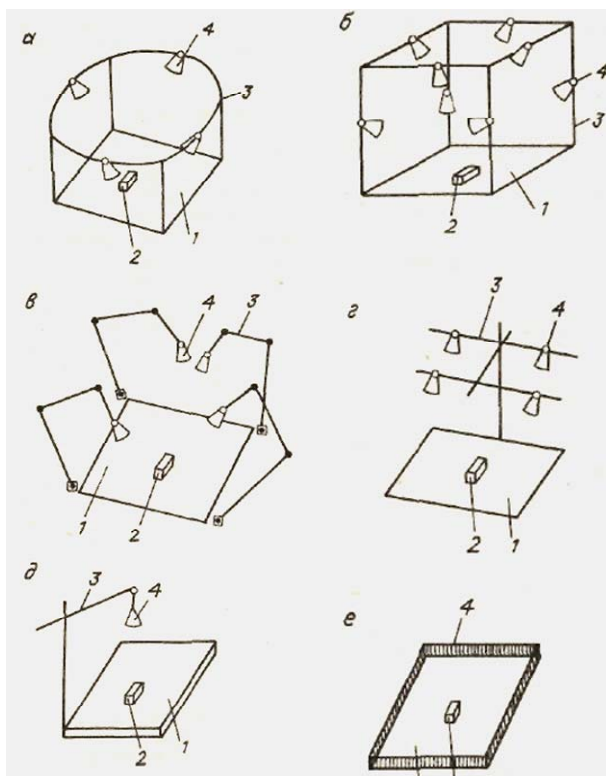


Рис. 2.2. Схемы размещения осветителей в рабочей зоне

При расчете осветителей рабочей зоны возникают 1) оптические проблемы и 2) проблемы взаимодействия с внешней средой [3]. Первая определяет взаимосвязь источника и приемника оптического

излучения. Освещенность рабочей сцены определяется при этом с помощью основного энергетического уравнения

$$\frac{\tau_c E_c}{L^2} (\rho_0 S_0 - \rho_n S_n) \geq m \frac{E_n}{\tau_0}, \quad (2.2)$$

где τ_c, τ_0 – коэффициенты пропускания среды, объектива соответственно; E_c – освещенность сцены; ρ_0, ρ_n – коэффициенты отражения объекта и помехи соответственно; m – отношение сигнал/шум; E_n – пороговая освещенность приемника оптического излучения; L – расстояние между объектом и объективом. Построенные графики и номограммы по энергетическому уровню позволяют выбрать необходимую освещенность либо определить параметры объекта при заданной освещенности.

К проблеме взаимодействия СТЗ с внешней средой относятся выбор фоновых поверхностей, исключение вибрации оборудования, а также перемещение объектов (сканирование). В связи с широким кругом решаемых задач СТЗ требуется оценка реальных условий функционирования системы.

2.3. Оптико-электронные приемники излучения

Координатными (координатно-чувствительными, позиционно-чувствительными) приемниками излучения называются приемники, в которых выходной сигнал зависит от местоположения облученного участка светочувствительной поверхности [2]. Кратко рассмотрим некоторые особенности основных типов таких аналоговых приемников, важные с точки зрения использования их в СТЗ роботов.

Координатные фоторезисторы (фотопотенциометры) представляют собой тонкопленочные многослойные структуры, которые для получения необходимого функционального преобразования имеют профилированный резистивный слой. Длина чувствительного слоя фотопотенциометра может достигать нескольких десятков миллиметров при разрешающей способности в десятки микрометров. Современные фотопотенциометры имеют недостаточную времен-

ную и температурную стабильность, хотя и обладают достаточно высокой надежностью и являются технологичными устройствами.

Координатный фотоприемник с продольным фотоэффектом состоит из $P-N$ -перехода, образованного низкоомной подложкой P -типа проводимости и высокоомным слоем N -типа проводимости. Координатная характеристика такого фотоприемника представляет собой зависимость сигнала на выходе от отклонения положения светового зонда (изображения) от центра фоточувствительной площадки прибора. Ее линейность определяется отношением отклонения на характеристике от линейного участка к максимальному сигналу в данной точке и составляет несколько процентов.

Имеются двухкоординатные фотоприемники с продольным фотоэффектом, однако линейность характеристики таких приборов уступает линейности однокоординатных.

Координатные фотоприемники, работающие на поперечном фотоэффекте, называются дифференциальными. Выходной сигнал таких фотоприемников, равный разности сигналов с фоточувствительных элементов, пропорционален смещению изображения относительно «нулевого» положения. К таким фотоприемникам относятся секторные или квадрантные фоторезисторы и фотодиоды. Важным параметром дифференциального фотоприемника является размер зоны нечувствительности, определяемый возможностями современной технологии. Для большинства приемников такого типа протяженность зоны нечувствительности составляет десятки и даже сотни микрометров. Не менее важна и стабильность «нулевой» точки (дрейф нуля).

Крутизна координатной характеристики и стабильность нулевой точки зависят от режима работы приемника, например, для квадрантного фотодиода в фотодиодном режиме его работы (при наличии смещения от внешнего источника) дрейф нуля ниже и крутизна на порядок выше, чем в вентильном режиме (в отсутствие внешнего смещения).

Координатный фотоприемник с радиальным электрическим полем относится к приборам, принцип работы которых основан на использовании дрейфа носителей заряда. Ему свойственны большая крутизна координатной характеристики, высокая разрешающая способность (единицы и даже десятые доли микрометра) при небольшой протяженности линейной зоны координатной характеристики

(до 1 мм). На базе таких приемников созданы развертывающие устройства, осуществляющие электронную развертку (сканирование) изображения, формируемого оптической системой на чувствительном слое приемника. Общий недостаток рассмотренных фотоприемников заключается в зависимости координатной характеристики от размеров и формы светового зонда (изображения) и распределения освещенности в зонде. Для дифференциальных фотоприемников характерны дополнительные погрешности, вносимые неидентичностью отдельных элементов.

Для устранения первого недостатка часто используют схемы стабилизации параметров источников излучения, применяемых в СТЗ роботов, а также специальные корректирующие звенья, вводимые в устройства обработки сигналов.

Сканистор – это координатный развертывающий фоточувствительный прибор, сканирование изображения в котором осуществляется путем последовательного сравнения падений напряжения в каждом сечении фоточувствительного слоя (эмиттера) с напряжением на эквипотенциальном фоточувствительном слое (коллекторе). Схема замещения сканистора представляет собой набор ячеек «фотодиод–диод», включенных встречно. При подаче пилообразного напряжения осуществляется последовательное во времени считывание потенциального рельефа, соответствующего распределению освещенности вдоль сканистора.

К числу МЭПИ, выполненных на основе МДП-структур, относят **приборы с инжекцией заряда** (ПЗИ МЭПИ). Принцип работы ПЗИ МЭПИ основан на преобразовании распределения освещенности в зарядовый рельеф, сохраняемый в обедненной области ПЗИ элементов. Считывание зарядов осуществляется путем их инжекции в полупроводниковую подложку при соответствующих изменениях потенциалов на электродах МДП-структур. К числу недостатков ПЗИ относят значительный уровень перекрестных связей между фоточувствительными элементами. Достоинство ПЗИ заключается в простой организации считывания информации.

Достижения микроэлектроники позволяют выполнять описанные выше МЭПИ в виде линеек и матриц, а также в виде структур с различными формами фоточувствительной площади, например с кольцевой для регистрации угловых смещений светового зонда. Схемы управления МЭПИ, как правило, размещаются на одном кристалле с

фоточувствительными элементами, что в значительной мере упрощает построение схем последующей обработки видеoinформации.

Сравнительные характеристики МЭПИ различного типа приведены в табл. 2.1. Хотя данные этой таблицы достаточно усредненные, они позволяют осуществить выбор типа МЭПИ для СТЗ роботов на стадии их проектирования.

Т а б л и ц а 2.1

Параметры типовых МЭПИ

Параметры	Тип фотоприемника			
	ФР	ФД	ФТ	ПЗС
Область спектральной чувствительности, мкм	0,4–30	0,4–1,1	0,4–1,1	0,4–1,1
Интегральная чувствительность	50–1000 В/Вт	0,1–25 мА/лм	10–1000 мА/лм	0,02–0,1 А/Вт
Минимальный шаг, мкм	50–200	16–250	25–100	8–25
Минимальный размер чувствительного элемента, мкм	30×120	8×64	16×64	6×12
Минимальное расстояние между элементами, мкм	20–100	8–150	8–100	2–16
Число элементов матрицы (линейки)	32×32–64×64 (2–64)	16×16–128×144 (2–2048)	4×4–128×144 (2–256)	16×16–512×625 (16–4096)
Частота считывания, кГц	0,1–10	100–1000	1–100	1–1000
Разброс интегральной чувствительности между элементами, %	10–50	4–25	30–75	10–25

Мозаичные преобразователи содержат мозаику оптико-электронных узлов, выполняющих функции регистрации и обработки видеосигналов. Один оптико-электронный узел мозаики может обрабатывать видеосигналы с одного (рис. 2.3, а) или нескольких (рис. 2.3, б, в) ближайших приемников излучения. Результирующий сигнал после обработки снимается с каждого узла с помощью схем словарной или матричной выборки или передается периферийным узлам мозаики. В последнем случае каждый узел мозаики выполняет также функции хранения и передачи информации. Различают анало-

говые и цифровые мозаичные преобразователи. В аналоговых преобразователях результатом преобразования аналоговых видеосигналов являются также аналоговые величины (ток, напряжение или заряд). В цифровых мозаичных преобразователях аналоговые видеосигналы преобразуются в цифровые коды, чаще всего в одноразрядные бинарные коды, которые затем обрабатываются цифровыми устройствами.

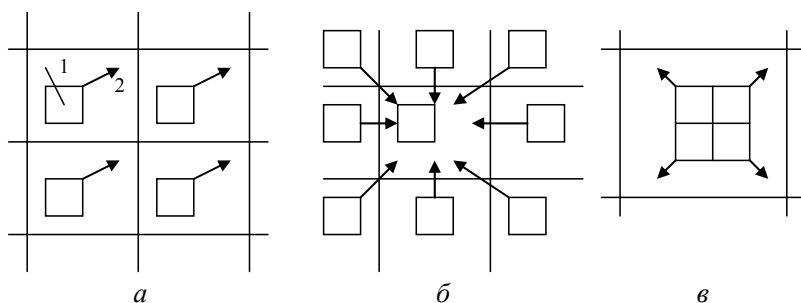


Рис. 2.3. Структурные схемы мозаичных преобразователей с обработкой сигналов с одного и нескольких приемников

Принципы построения аналоговых мозаичных преобразователей рассмотрим на примере схемы линейки узлов выделения разностных видеосигналов (рис. 2.4). Каждый узел мозаики содержит фоторезистор R_i , нагрузочный регистр $R1_i$, интегратор ($R2_iC_i$ цепочка), развязывающие диоды $VD1_i, VD2_i$. Смежные узлы соединены через развязывающие диоды. Между шиной питания и общей шиной на линейку подаются разнополярные импульсы или синусоидальное переменное напряжение с периодом T . Если $R2_iC_i > T$, то фотосигналы на выходных шинах X_i

$$U_i \approx \frac{1}{R2_iC_i} \int_0^T R1_i [I_i(T) - I_{i+1}(t)] dt. \quad (2.3)$$

При одинаковых уровнях потоков излучения Φ_{ei}, Φ_{ei+1} , падающих на фоторезисторы R_i, R_{i+1} , разностный фотосигнал $U_i \approx 0$. Ко-

гда соседние фоторезисторы расположены на границе свет-тьень, $U_i < 0$, для границы тень-свет $U_i > 0$. Таким образом, осуществляется операция дифференцирования изображения. На аналогичном принципе строят матричный аналоговый дифференцирующий мозаичный преобразователь.

Аналоговые мозаичные преобразователи нашли ограниченное применение, так как аналоговые узлы обработки видеосигналов, выполненные на биполярных, полевых и МОП-транзисторах, характеризуются значительными аппаратными затратами и высокой чувствительностью к разбросу параметров элементов электронных схем.

Перенос зарядовых пакетов между элементами ПЗС-матриц в различных направлениях, управляемый потенциалами на электродах переноса $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, их конфигурацией и конструктивными направляющими элементами, позволяет осуществлять операции сдвига зарядового рельефа и поэлементного суммирования зарядовых пакетов.

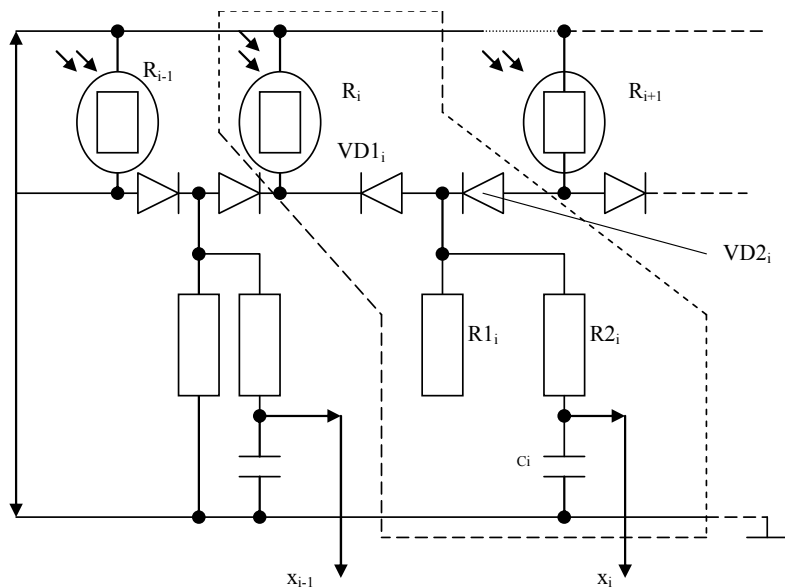


Рис. 2.4. Схема выделения разностных сигналов смежных элементов строки мозаики

Сдвиг зарядовых пакетов в четырех возможных направлениях осуществляется в ПЗС-матрице с пятью группами ненаправленных электродов 1, 2, ..., 5 переноса при соответствующей последовательности тактовых сигналов (рис. 2.5, *a*). Роль приемников излучения выполняют или все элементы ПЗС-матрицы, или отдельные элементы, не покрытые светозащитным слоем. В центре или на периферии мозаики можно располагать узлы разрушающего или неразрушающего считывания зарядовых пакетов. Большое число групп электродов переноса существенно усложняет конструкцию ПЗС мозаичного преобразования и схемы, необходимой для его питания.

Ограничение направлений переноса путем введения конструктивных направляющих элементов (диффузионных стоп-каналов, слоев подэлектродного оксида различной толщины) позволяет снизить число групп переноса до трех. Введение специальных групп горизонтального и вертикального переноса позволяет реализовать ПЗС-структуры с ненаправленным и направленным переносом зарядовых пакетов. Дополнительные функциональные возможности дает введение недоступных для зарядовых пакетов областей. В ПЗС-мозаике, структура которой показана на рис. 2.5, *б*, каждый узел содержит 3×3 электродов, объединенных шинами фазового питания $\Phi 1$, $\Phi 2$ и $\Phi 3$, причем под одним из девяти электродов может быть расположена недоступная для зарядовых пакетов область.

Рассмотрим процедуры выполнения типичных операций аналоговыми мозаичными преобразователями на ПЗС-структурах. Адаптация апертуры многоэлементного приемника излучения в целях получения максимального отношения сигнал/шум.

Поэлементное считывание зарядовых пакетов с ПЗС-структуры характеризуется следующим отношением сигнал/шум:

$$U_c / U_{\emptyset} = U_{cij} / (U'_{\emptyset ij} + U''_{\emptyset ij}), \quad (2.4)$$

где U_{cij} – сигнал элемента i, j ; $U'_{\emptyset ij}$ – первая (фоновая) составляющая шума; $U''_{\emptyset ij}$ – вторая (коммутационная) составляющая шума.

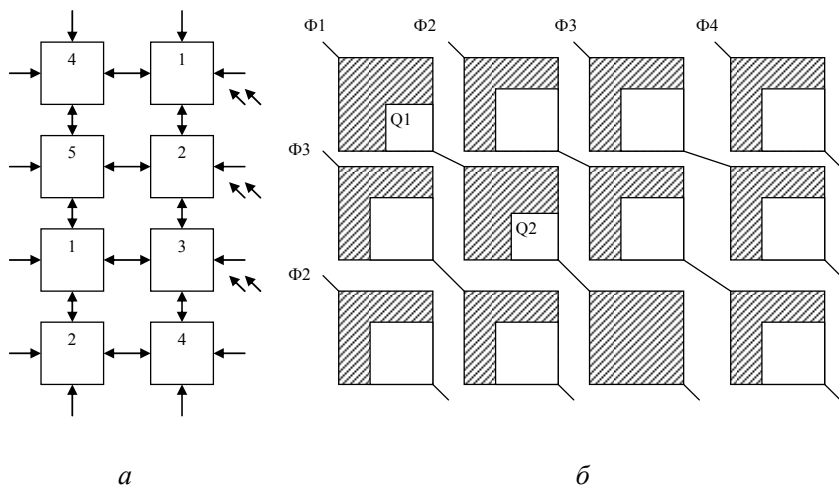


Рис. 2.5. Структурные схемы ПЗС-мозаик с ненаправленным и направленным переносом информации

Выделение существенных признаков объекта при сильно зашумленном его изображении достигается введением более грубого раstra, причем видеосигнал с каждого элемента грубого раstra получают путем суммирования фотосигналов, соответствующих принадлежащим ему элементам мелкого раstra. Выполнение операций суммирования вне ПЗС-приемника излучения не дает существенного выигрыша в отношении сигнал/шум, так как одновременно с видеосигналами суммируются первая и вторая составляющие шума. Суммирование n зарядовых пакетов на уровне кристалла ПЗС-преобразователя и считывание результирующих зарядов позволяют существенно повысить отношение сигнал/шум. Действительно, после суммирования получаем

$$U_c / U_\emptyset = \sum_{ij}^n U_{cij} / \left(\sum_{ij}^n U'_{\emptyset ij} + U''_{\emptyset} \right). \quad (2.5)$$

Таким образом, путем потери разрешающей способности в \sqrt{n} раз удается поднять отношение сигнал/шум в $(U'_{\emptyset} + U''_{\emptyset}) / (\bar{U}'_{\emptyset} + \bar{U}''_{\emptyset} / n)$ раз (отметим, что $\bar{U}'_{\emptyset} \ll U'_{\emptyset}$).

Для структуры, показанной на рис. 2.5, б, поэлементное суммирование зарядовых пакетов Q_1, Q_2 осуществляется при включении сигналов переноса в последовательности 3-1-3.

Поиск контура, линий одного уровня или положения максимума зарядового рельефа. Эта операция в мозаичных ПЗС-структурах реализуется при введении в центр мозаики неразрушающего узла считывания при адаптивном фазировании тактовых сигналов на электродах переноса с помощью микропроцессора (рис. 2.6). Например, для поиска контура зарядового рельефа, занимающего не более V_4 – площади мозаичного преобразователя, необходимо осуществлять пошаговый сдвиг зарядового рельефа в соответствии с траекторией обхода, показанной на рис. 2.7.

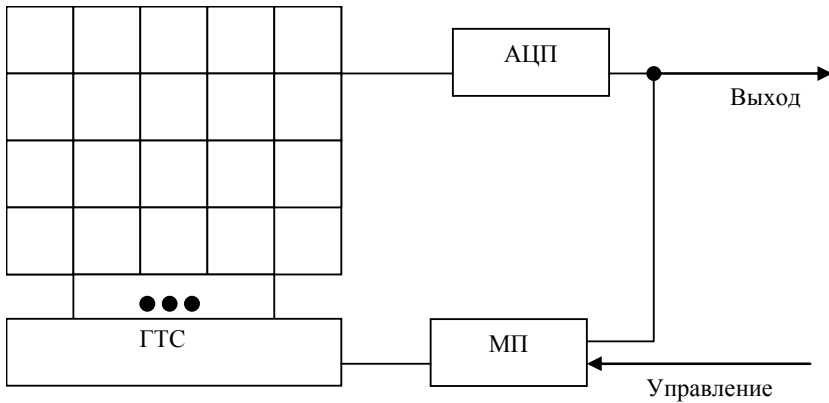


Рис. 2.6. Схема адаптивного фазирования управляющих сигналов ПЗС-мозаики с помощью микропроцессора: МП – микропроцессор; ГТС – генератор тактовых сигналов; АЦП – выходной аналого-цифровой преобразователь

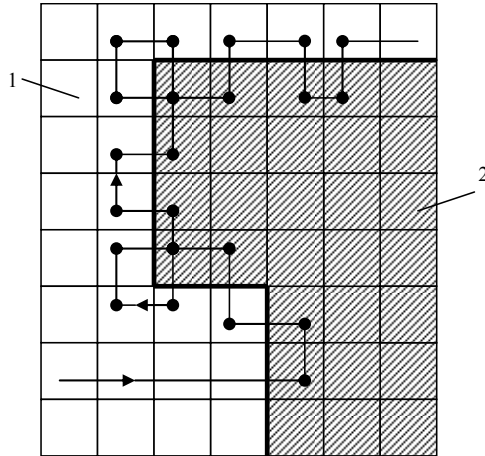


Рис. 2.7. Траектория пошагового сдвига зарядового пакета в мозаике в случае поиска контура зарядового рельефа:
1 – освещенная область; *2* – неосвещенная область

Цифровые мозаичные преобразователи выполняются на основе АЦП, комбинационных схем и триггерных элементов. Например, линейная мозаика для выделения разностных бинарных видеосигналов может быть построена на линейке приемников излучения, связанных с компараторами и *R-S*-триггерами для хранения результатов преобразования (рис. 2.8, *а*). В качестве компараторов можно использовать фототриггеры – запоминающие элементы с оптической записью информации, построенные на биполярных или МОП-транзисторах, фототиристорах (рис. 2.8, *б*).

Существенное расширение функциональных возможностей цифровых мозаичных преобразователей достигается путем их выполнения на основе однородных вычислительных сред, например прямоугольной мозаики из столбцов и строк. Каждый узел мозаики содержит по крайней мере один приемник излучения и АЦП (компаратор), а также логический преобразователь – перестраиваемый автомат с фиксированными входами настройки.

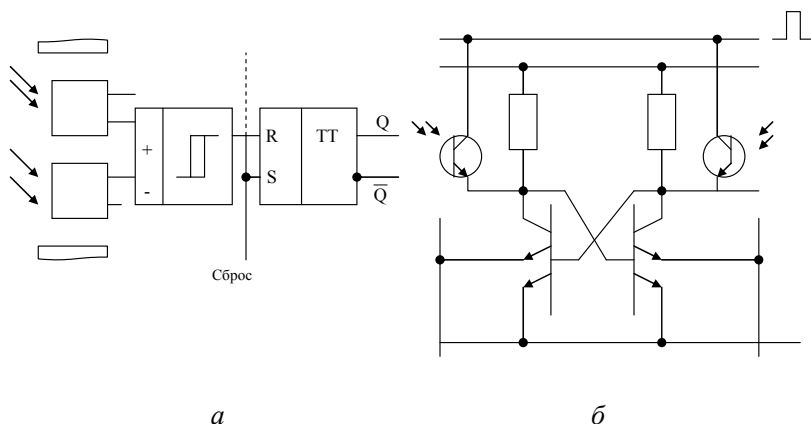


Рис. 2.8. Электрические схемы элементов мозаики, построенные на основе дифференциальных фотореле

Автомат с простой последовательной настройкой (рис. 2.9) имеет настроечные входы S_1-S_4 , информационные входы X_1-X_4 , часть которых связана с выходами АЦП, и информационные выходы Y_1-Y_4 . Настроечные сигналы поступают по входам S_1-S_4 через вентиль L в регистр R_r . Часть сигналов, обеспечивающих настройку логического модуля A , выполняющего логические операции, записывается в разряды R_1-R_m регистра. Для коммутации связи модуля A с четырьмя ближайшими соседями мозаики служат разряды $R_{m+1}-R_{m+n}$ регистра, куда записывается информация, определяющая характер связи при вводе данных в модуль A . Последний сигнал, поступающий на регистр, отключает его настроечные входы от среды и включает вентиль Φ ; в следующий момент времени сигналы настройки передаются на другие автоматы.

После окончания настройки среда работает как схема из автоматов, алгоритм функционирования которых задан настройкой. Обычно перестраиваемые автоматы реализуют одну или несколько булевых функций одной или нескольких переменных и констант. Видеосигналы, снимаемые с приемников излучения мозаики, могут быть использованы в качестве переменных, а также для перестройки алгоритма работы однородной вычислительной среды.

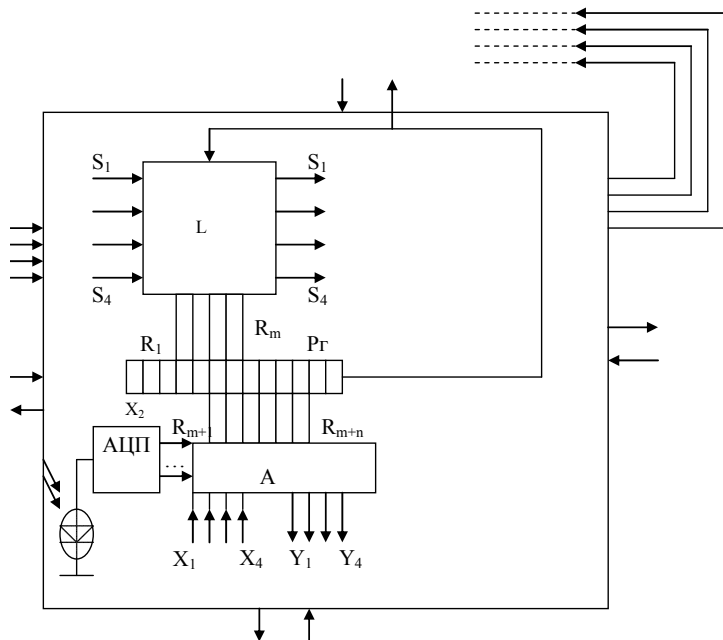


Рис. 2.9. Электрическая схема элемента мозаики, выполненного на базе однородной вычислительной среды

Основным достоинством цифровых мозаичных преобразователей, содержащих однородные вычислительные среды, является высокая скорость выполнения процедур обработки изображений. К недостаткам следует отнести низкий коэффициент заполнения площади мозаики фоточувствительными площадками приемников излучения и, как следствие, малое число узлов на одной твердотельной мозаике (16–64).

Телевизионная передающая камера (ТПК) представляет собой оптико-электронный функциональный преобразователь, который в общем случае содержит: вакуумную передающую телевизионную трубку или МЭПИ; оптическую систему, основным элементом которой является объектив; блок формирования сигналов развертки; блок усиления и преобразования видеосигнала; устройство фокусировки и наведения. Состав и основные характеристики ТПК существенно зависят от ее

назначения, объема и характера передаваемой видеоинформации, условий работы и т.п. В СТЗ роботов находят применение ТПК для черно-белого и цветного телевизионного вещания, промышленные ТПК, стереоскопические и панорамные ТПК.

Отечественная промышленность выпускает широкую номенклатуру передающих телевизионных трубок различного назначения. Диссекторы находят применение в специализированных ТПК, форма траектории развертки в которых существенно отличается от общепринятой телевизионной. Световые характеристики диссекторов линейны в широком диапазоне освещенностей (3–5 порядков). В системах контроля линейных размеров рекомендуется использовать высокоточные диссекторы ЛИ605-3. Регистрация точечных объектов осуществляется диссекторами ЛИ604К1, ЛИ607–ЛИ612 (координаторы). Регистрацию контрастных (графических) изображений в растровом режиме рекомендуется осуществлять диссекторами ЛИ605-1, ЛИ611. В условиях большой освещенности с высокой разрешающей способностью работают диссекторы ЛИ611, ЛИ612.

В ТПК общего назначения применяют суперортиканы и видиконы. Суперортиканы обладают высокой чувствительностью, но сложны по устройству и в эксплуатации, имеют сравнительно большие размеры. Для прикладных ТПК используют суперортиканы ЛИ201, ЛИ204, ЛИ213, ЛИ215, ЛИ216, ЛИ219, ЛИ221–И224. Суперортиканы ЛИ207, ЛИ227–ЛИ234 позволяют длительное время проецировать на фотокатод неподвижное изображение без эффекта «выжигания». Фотоэлектрические характеристики суперортиканов сильно зависят от температуры, поэтому при их эксплуатации в ряде случаев необходимо использовать специальные системы термостабилизации.

Видиконы имеют значительно меньшие размеры, чем суперортиканы, более просты в эксплуатации, но менее чувствительны и имеют достаточно высокую инерционность. Материал мишени большинства видиконов – трехсернистая сурьма. В некоторых видиконах мишени выполнены на основе оксида свинца (ЛИ432, ЛИ442, ЛИ457, ЛИ465), кремния (ЛИ446) и др. Видиконы с подобными мишенями иногда называют соответственно плюмбиконами, кадмиконами, пириконами, кремниконами и т.п. – по типу материала, используемого в мишенях. Принципиальное отличие кремниконов от видиконов других типов заключается в конструкции мишени. Мишень кремникона в виде мат-

рицы фотодиодов формируется в пластине монокристаллического кремния методами фотолитографии, используемыми для изготовления интегральных схем.

В прикладных ТПК используют видиконы типа ЛИ426–ЛИ448. Видиконы ЛИ414 и ЛИ429 обеспечивают длительное хранение (5–10 мин) изображения после разовой эксплуатации и многократного (до 20 тыс. раз) считывания. Видиконы ЛИ439 и ЛИ446 отличаются повышенной чувствительностью и пониженной инерционностью, однако имеют малый динамический диапазон по освещенности.

Спектральные характеристики передающих телевизионных трубок охватывают всю видимую и ближнюю инфракрасную части спектра. Распределение чувствительности по спектру для некоторых трубок существенно отличается от кривой видности глаза, что необходимо учитывать при расчетах. Некоторые трубки способны регистрировать изображение в инфракрасной части спектра.

Основные характеристики отечественных передающих телевизионных трубок приведены в табл. 2.2, где E_{\min} , E_{\max} – минимальные и максимальные значения рабочей освещенности.

В ТПК, как правило, используются специальные телевизионные объективы, при конструировании которых учитывается наличие в оптическом пути плоскопараллельной стеклянной пластины.

В обозначение типа телевизионного объектива добавляется буква «Т». В случае необходимости в ТПК используют вариообъективы, в которых фокусное расстояние, а соответственно и масштаб изображения могут плавно изменяться в сравнительно широких пределах. Положение плоскости изображения при этом остается неизменным и совмещенным с плоскостью фоточувствительной поверхности мишени. В ТПК в зависимости от их назначения могут использоваться фотографические, киносъемочные и другие объективы.

Т а б л и ц а 2.2

Основные характеристики передающих телевизионных трубок

$\frac{E_{\min, \text{ЛК}}}{E_{\max, \text{ЛК}}}$	%					
<i>Диссекторы</i>						
$\frac{0,2}{100}$	125–3500	18–50	5–15	–	–	4
<i>Суперортиканы</i>						
$\frac{5 \cdot 10^{-4}}{5}$	500–1000	3–80	10–25	10–50	30–80	2–5
<i>Видиконы</i>						
$\frac{0,5}{1000}$	400–600	2–50	10–30	20–60	20–80	1–3

Основные характеристики ряда объективов, нашедших наибольшее применение, приведены в табл. 2.3, где f' – фокусное расстояние; m – кратность изменения фокусного расстояния, $m = f'_{\max} / f'_{\min}$; K – диафрагменное число; 2ω – угловое поле; n – разрешающая способность; τ_0 – коэффициент пропускания.

Фокусное расстояние объектива ТПК можно выбрать, используя номограмму, приведенную на рис. 2.10.

Т а б л и ц а 2.3

Основные характеристики объективов ТПК

Объектив	f' , мм	m	K	$2\omega^\circ$	n , линий / мм	τ_0
<i>Телевизионные</i>						
«Мир»	27–37	–	3,5–2,8	70–57	23–55	–
«Гелиос»	50	–	2,0	44	–	0,8
«Эра»	52–100	–	1,8–2,0	27–23	21–48	0,8
«Таир»	135–1000	–	2,8–8,0	17–2,3	28–52	0,8–0,65
<i>Киносъёмочные</i>						
ОКС	10...150	–	2,0...2,8	64...10	35...65	0,82...0,65
<i>Вариообъективы</i>						
«Вариогоир» «Вариограмма» и др.	11,8–120,0	2,2–10,0	1,7–2,5	72–10	–	–

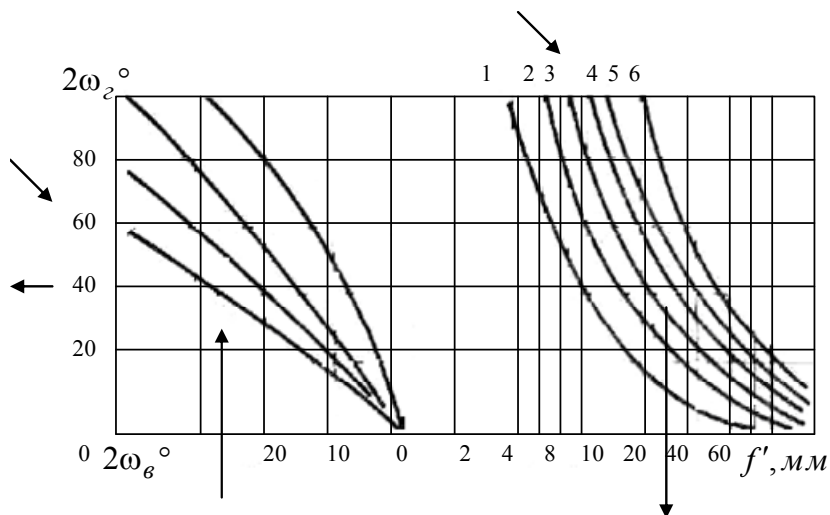


Рис. 2.10. Номограмма для выбора фокусного расстояния объектива ТПК:

1 - $d = 7,5$ мм; 2 - $d = 12$ мм; 3 - $d = 16$ мм;

4 - $d = 21$ мм; 5 - $d = 25$ мм; 6 - $d = 40$ мм

Исходными данными для выбора значения f' являются формат кадра p или горизонтальное угловое поле $2\omega_{\Gamma}$, вертикальное угловое поле $2\omega_{\text{в}}$ и диаметр d фоточувствительной поверхности мишени передающей телевизионной трубки.

Оптическая система ТПК может быть дополнена специальными средствами, например для проецирования на фоточувствительную поверхность маркерных меток, используемых для калибровки и контроля параметров ТПК. В цветных ТПК в состав оптической системы входят светофильтры и светоделительные элементы.

Существует несколько вариантов построения стереоскопических ТПК. В двухтрубчатых системах, в которых оптические оси объективов параллельны (рис. 2.11, *a*), имеет место неискаженное проецирование изображений стереопары на фоточувствительные мишени трубок. Однако такая система не позволяет наблюдать за объектами, находящимися вблизи ТПК. Протяженность $l_{\text{н}}$ недоступной для наблюдения зоны $l_{\text{н}} = b / \text{tg } \omega$, где b – расстояние между опти-

ческими осями трубок. Кроме того, такая система характеризуется малым полем обзора. В двухтрубчатых системах с объективами, имеющими скрещенные оси (рис. 2.11, б), протяженность зоны, недоступной для наблюдения, меньше, а поле обзора больше. Однако этой схеме присущи трапецеидальные искажения формата кадра в вертикальном и горизонтальном направлениях.

ТПК панорамного обзора, например для СТЗ транспортных роботов, строят на основе оптико-механических развертывающих систем или специальных объективов, например торических объективов Манжена.

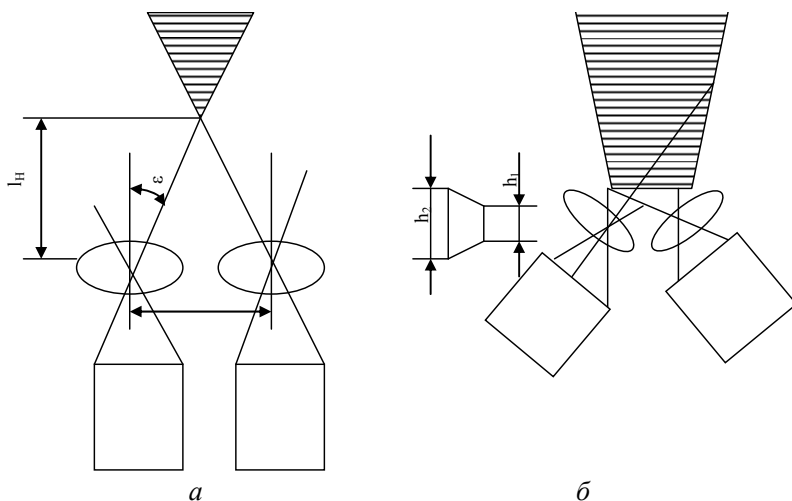


Рис. 2.11. Схемы построения стереоскопических ТПК с объективами, имеющими параллельные и скрещенные оптические оси:
 h_b и h_i – размеры сторон кадра при трапецеидальных искажениях

К основным узлам любой ТПК относят электронные схемы формирования сигналов развертки, усиления и преобразования видеосигнала. Для считывания зарядового рельефа и формирования видеосигнала необходимо подать соответствующие электрические сигналы развертки на электростатическую или электромагнитную фокусирующе-отклоняющую систему передающей телевизионной

трубки. Различают цифровую и аналоговую развертки. При цифровой развертке электронный луч считывает зарядовый рельеф с фиксированных участков – пикселей фоточувствительной мишени. Совокупность пикселей составляет растр размером $N \times N$ пикселей. Схемы цифровой развертки выполняют на основе генераторов ступенчатых напряжений, содержащих пересчетные схемы и ЦАП.

При аналоговой развертке видеосигнал соответствует зарядовому рельефу, считываемому электронным лучом при его движении по определенной траектории. Наибольшее применение в телевизионных устройствах СТЗ нашли прямая строчная и чересстрочная развертки. В случае чересстрочной развертки (ГОСТ 7845–79) последовательно во времени считываются два полукадра, первый содержит нечетные строки, а второй – четные, что необходимо учитывать при построении аппаратных средств обработки видеoinформации и при ее вводе в запоминающее устройство микроЭВМ.

Помимо строчной развертки, в специализированных ТПК применяют развертку по спиральным, розеточным и другим траекториям. Схемы развертки такого типа строят на основе генераторов гармонических сигналов, выполненных на аналоговых ИМС.

Усиление и преобразование видеосигнала осуществляется электронными блоками ТПК.

В состав ТПК входит ряд вспомогательных электронных узлов – схем автоматики. К числу наиболее важных относятся схемы автоматической регулировки освещенности фоточувствительной мишени; схемы автоматической фокусировки; схемы автоматического наведения.

Принцип действия автоматической регулировки освещенности схемы с независимым контуром управления поясняет рис. 2.12. В ТПК помимо основного объектива 1 установлен второй объектив 4, проецирующий изображение на фотоприемник 6, с которого снимается сигнал, пропорциональный средней освещенности в поле изображения. Сравнение этого сигнала с опорным в блоке 7 позволяет формировать сигналы, управляющие исполнительным механизмом 8 (электродвигатель с редуктором), который изменяет диаметр апертурных диафрагм 2, 5 основного и вспомогательного объективов. В результате работы схемы поддерживается примерно постоянный уровень освещенности мишени передающей телевизионной трубки 3.

Если фотоприемник разместить у фоточувствительной поверхности трубки в пределах поля зрения объектива, но за границами кадра, то можно осуществлять регулировку уровня освещенности мишени без дополнительного объектива. В качестве датчика уровня освещенности можно использовать передающую телевизионную трубку, если измерять среднее значение видеосигнала.

В ТПК на видиконах необходимую стабилизацию уровня видеосигнала при различных освещенностях в поле изображения обеспечивает схема автоматической регулировки чувствительности. Освещенность мишени в данном случае не регулируется, а изменяется режим работы видикона таким образом, чтобы он был оптимальным для заданного уровня освещенности.

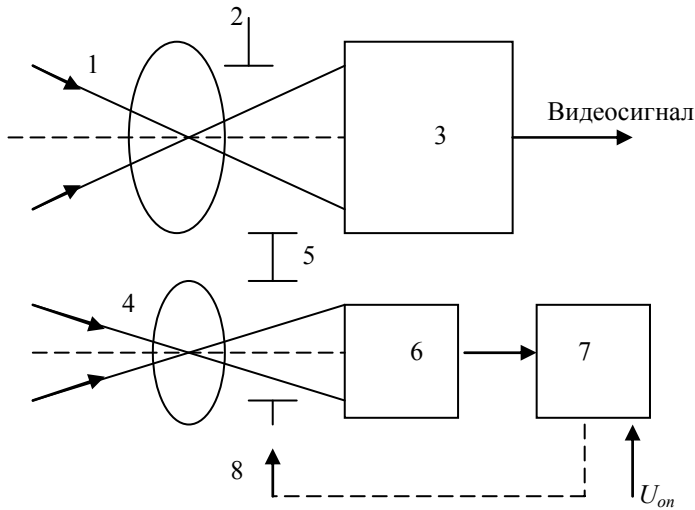


Рис. 2.12. Схема автоматической регулировки освещенности

Типовые параметры рассмотренных координатных аналоговых приемников излучения приведены в табл. 2.4.

Расширение функциональных возможностей видеосенсора в СТЗ роботов, получение информации о требуемой точности и в необходимом объеме с минимумом аппаратных и программных затрат могут быть достигнуты в случае применения многоэлементных прием-

ников излучения (МЭПИ), выполняемых на основе твердотельной или пленочной технологии. Эти фотоприемники характеризуются многими параметрами и характеристиками, используемыми для описания свойств одноэлементных фотоприемников. Однако специфика конструктивного исполнения обусловила и ряд новых параметров. Геометрическую (пространственную) разрешающую способность МЭПИ определяют межэлементное расстояние и шаг (расстояние между соседними фоточувствительными площадками и их центрами). Погрешности МЭПИ обусловлены нерегулярностью расположения элементов, разбросом чувствительности элементов и паразитными межэлементными связями.

Т а б л и ц а 2.4

Типовые параметры координатных аналоговых фотоприемников

Тип фотоприемника	Фоточувствительная площадь, мм	Чувствительность, В/(мм·мВт)	Нелинейность координатной характеристики, %
Фоторезистор (фотопотенциометр)	1×1–10×10	0,5–1,0	1–5
Разрезной (квадрантный) фотодиод	1×1–10×10	0,1–0,5	0,5–5
Фотоприемник с радиальным полем	2×2–10×10	0,5–1,0	2–10
Фотоприемник с продольным фотоэффектом	2×2–10×10	1–2	2–8
Сканистор	2×20–10×50	10–50 лин/мм	5–15

Технологически освоенным фотоприемником, выполняемым на основе пленочной или твердотельной технологии, является **фоторезистивный МЭПИ** (ФР МЭПИ), содержащий матрицу фоторезисторов. В качестве материалов для выполнения ФР МЭПИ используют PbS, PbSe, CdS, CdSe, что и определяет широкий спектральный диапазон их работы (0,4–30 мкм). Структура ФР МЭПИ позволяет осуществлять несколько способов считывания сигналов с фоторезисторов: последовательный с применением одного канала передачи видеосигналов, параллельный с использованием нескольких каналов и произвольный, когда доступным для обращения является каждый

элемент МЭПИ. Достоинством ФР МЭПИ является простота технологии его изготовления, недостатком – ограниченное количество фоточувствительных элементов из-за роста паразитных перекрестных связей. К недостаткам ФР МЭПИ следует отнести также эффект старения, низкие фоточувствительность и быстродействие.

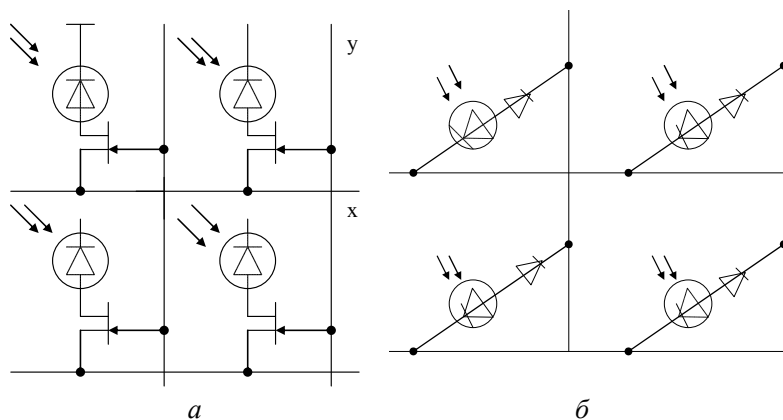


Рис. 2.13. Структура фотодиодных матриц с ключами:
а – на полевых транзисторах; б – на диодах

Более перспективны фотодиодные МЭПИ (ФД МЭПИ), имеющие высокое быстродействие и сравнительно высокую чувствительность. Такие приборы изготавливают на основе технологии кремниевых интегральных схем. Наиболее распространены ФД МЭПИ с матричной структурой, представляющие собой матрицу фотоячеек, объединенных системой вертикальных и горизонтальных шин. Схемы считывания, реализующие последовательную, параллельную или произвольную выборку видеосигналов с каждого элемента МЭПИ, могут быть выполнены совместно с фотодиодной матрицей на одном кристалле или в виде отдельных устройств. В последнем случае с ростом числа фотодиодов в МЭПИ увеличивается число соединительных проводников, что снижает надежность работы фотоприемного устройства и приводит к возрастанию его стоимости.

В матричных ФД МЭПИ (рис. 2.13) в качестве ключевых элементов, развязывающих между собой фотодиоды, используют поле-

вой транзистор (рис. 2.13, а) или диод (рис. 2.13, б). Для быстродействующих ФД МЭПИ ключевые развязывающие элементы выполняются на основе диодов с малыми емкостями, например в виде двухдиодной ключевой схемы.

Различают два режима работы ФД МЭПИ: 1) регистрации мгновенных значений фототока, когда сигнал пропорционален уровню освещенности фотодиода в каждый момент времени; 2) накопления заряда, когда сигнал пропорционален экспозиции (интегралу от освещенности по времени) за интервал времени, называемый временем интегрирования или накопления. Второй режим позволяет получить достаточно большие уровни сигнала даже при малых уровнях освещенности. Следует отметить, что по сравнению с ФР МЭПИ ФД МЭПИ обладают повышенным быстродействием, однако они имеют сравнительно малый выходной сигнал и требуют использования малошумящих усилительных элементов для согласования с последующими устройствами.

От указанного недостатка свободны фототранзисторные многоэлементные фотоприемники (ФТ МЭПИ), которые в зависимости от типа фототранзистора разделяют на биполярные, полевые и МДП. Преимущество фототранзистора как элемента для построения МЭПИ заключается в том, что он одновременно выполняет функции фотоприемника, усилителя и развязывающего элемента. Недостатком ФТ МЭПИ является значительный разброс коэффициентов усиления транзисторов, достигающий десятков процентов в матрицах с большим числом элементов.

К числу наиболее совершенных МЭПИ относятся приборы с зарядовой связью (ПЗС), принцип работы которых основан на преобразовании распределения освещенности в регистрируемом изображении в распределение носителей заряда (зарядовый рельеф), сохраняемых в потенциальных ямах под электродами МДП-структур. Считывание сигнала осуществляется путем последовательного или параллельного переноса зарядового рельефа от одних МДП-структур к другим с регистрацией соответствующих изменений потенциала, наводимых на электродах выходных МДП-структур.

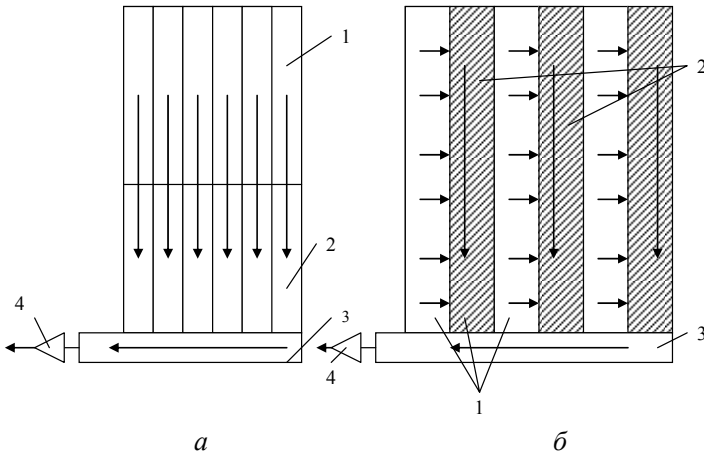


Рис. 2.14. Матрицы ПЗС с кадровым и строчно-кадровым переносом заряда

В зависимости от физической реализации различают два типа ПЗС: приборы с поверхностным переносом заряда и приборы со скрытым каналом (с объемным переносом). Преимущества ПЗС со скрытым каналом заключаются в увеличении быстродействия и эффективности переноса заряда, в снижении уровня шумов. Схемы управления ПЗС подразделяют на двух-, трех- и четырехтактные.

Спектральный диапазон работы ПЗС МЭПИ определяется материалом полупроводниковой подложки и для большинства промышленных приборов, выполняемых из кремния, включает видимую и ближнюю инфракрасную области.

По способу организации структуры ПЗС МЭПИ различают приборы с кадровым и строчно-кадровым переносом заряда. В приборах с кадровым переносом (рис. 2.14, а) имеется секция 1 накопления (фоточувствительная секция), секция 2 хранения и выходной регистр 3. При подаче управляющих сигналов на электроды такого ПЗС МЭПИ осуществляется регистрация изображения путем накопления зарядов в секции накопления. Затем за время переноса зарядовый рельеф сдвигается в секцию хранения.

2.4. Телевизионные камеры

Телевизионные камеры. Вначале рассмотрим ТК на фотодиодной матрице. Такие ТК имеют основной недостаток – малое значение амплитуды видеосигнала при малом отношении сигнал/шум. От такого недостатка свободна ТК, описанная ниже.

Для выяснения особенностей работы данной телекамеры рассмотрим устройство ячейки фотоприемника матрицы, электрическая схема которой изображена на рис. 2.16. Ячейка работает следующим образом. Транзистор v функционирует как ключ. При подаче (на C_4) импульса «стирание» отрицательной полярности относительно подложки C_4 ключ v отпирается и емкость C фотодиода заряжается до напряжения питания, подаваемого на общую шину C . По окончании импульса «стирание» начинается процесс накопления информации, заключающийся в разряде емкости C фотодиодов потоком светового излучения. Пространственное распределение интенсивности освещения – по полю фотоматрицы ведет к различию в скорости разряда емкостей фотодиодов, и к концу времени накопления на решетке ячеек $A_1 * A_{32}$ (рис. 2.17) фотодиодов матрицы (M) образуется потенциальный рельеф, который соответствует сфокусированному на ней изображению. Далее производится считывание этого рельефа посредством подачи управляющего импульса на вертикальную (Y) шину, что приводит к открытию ключа на транзисторе и появлению сигнала с фотодиода V_2 (через транзистор, имеющий питание через шину C_2) на горизонтальной шине X . Этот сигнал снимается с резистора R при замыкании ключа (Кл), являющегося элементом коммутатора (К). Регистр (РГ) обеспечивает подключение требуемой строки матрицы. Указанная реализация ТК позволяет снимать видеосигнал амплитудой 3–5 В при отношении сигнал/шум 10–20. Это обеспечивает высокое качество работы камеры по сравнению с известными ТК.

Далее рассмотрим особенности разработки ТК на ПЗС-матрице. Известные ТК указанного типа имеют следующие недостатки: затруднен вывод изображения, формируемого ТК, на видеоконтрольное устройство (ВКУ), так как схема синтеза синхроимпульсов для ВКУ не обеспечивает телевизионный стандарт; низкая чувствительность ТК для регистрации слабоосвещенных объектов при использовании частот разверток, обеспечивающих телевизионный стан-

дарт; базовый генератор тактовых импульсов (на микросхеме А-1057) не обеспечивает развертки изображения по кадру на весь экран ВКУ.

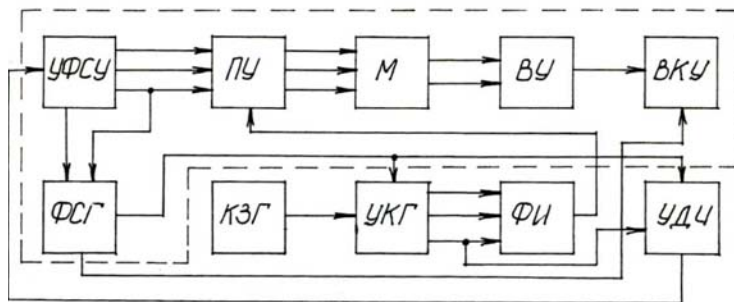


Рис. 2.15. Структурная схема телевизионной камеры на ПЗС-матрице

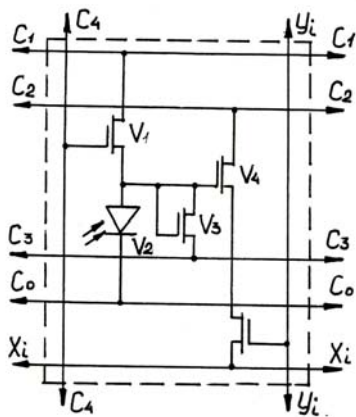


Рис. 2.16. Электрическая схема ячейки фотодиодной матрицы

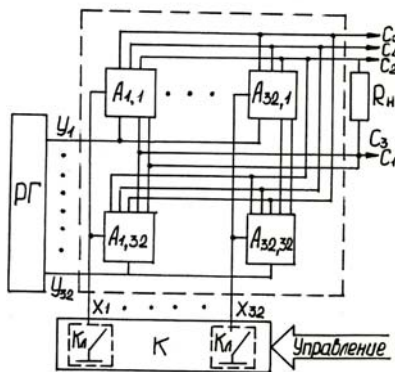


Рис. 2.17. Структурная схема части телевизионной камеры на фотодиодной матрице

Для устранения вышеуказанных недостатков разработана ТК, в которой в основную часть известной видеокамеры (на рис. 2.15 она обведена пунктиром) включены кварцевый задающий генератор

(КЗГ), управляемый кольцевой генератор (УКГ), формирующий инвертор (ФИ) и управляемый делитель частоты (УДЧ). Основная часть ТК содержит следующие узлы: УФСУ – управляемый формирователь сигналов управления; ПУ – преобразователь уровня; М – матрица, состоящая из секции накопления, секции памяти и выходного регистра; ВУ – видеоусилитель; ФСГ – формирователь сигналов гашения; ВКУ – видеоконтрольное устройство, поэтому кратко поясним усовершенствования камеры. Чувствительность ТК зависит от времени накопления на каждом элементе ПЗС-матрицы, задаваемого частотой КЗГ. Повышение чувствительности, требуемой при регистрации объектов с малой освещенностью, наиболее просто реализовать путем увеличения частоты тактовых импульсов КЗГ. При этом возрастает время регистрации одного кадра изображения (и удваивается длительность строки (128"с)). Для сохранения телевизионного стандарта, при котором вывод информации с выходного регистра матрицы должен быть осуществлен в течение 64" с, введены КЗГ, УКГ и ФИ. При работе импульсы ЗГ, удвоенные с помощью УДЧ, подаются на УФСУ (причем УКГ останавливается на время гасящего синхроимпульса). Такое техническое решение обеспечивает получение необходимой чувствительности ПЗС-матрицы и создает развертку изображения по кадру почти на весь экран телевизора (576 строк).

2.5. Видеопроцессоры

Видеопроцессор. Рассмотрим два варианта ВП: параллельного и последовательного типа. ВП параллельного типа состоит из шестнадцати идентичных микропроцессорных модулей UM1–MM16 и центрального процессора ЦП (рис. 2.18). Каждый микропроцессорный модуль содержит по два ОЗУ: в первом ОЗУ хранится программа обработки изображения, а в другом – фрагмент кадра изображения, который нужно обработать. Программа в первое ОЗУ заносится центральным процессором, а информация во второе ОЗУ – блоком ввода контурных изображений (БВКИ).

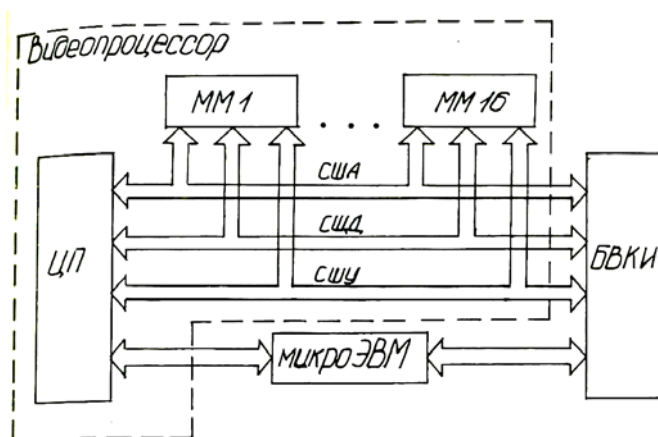


Рис. 2.18. Структурная схема видеопроцессора параллельного типа

Обработка изображения ведется одновременно (параллельно) всеми микропроцессорными модулями. Результат обработки изображения заносится в первое ОЗУ. Локальные шины модуля связаны с системными шинами видеопроцессора посредством соответствующего шинного формирователя.

Видеопроцессор содержит три системные шины: адреса – США, данных – СШД, управления – СШУ. ЦП управляет работой всех микропроцессорных модулей, БВКИ и поддерживает связь с микроЭВМ. ЦП состоит из микропроцессора, дешифратора адреса, ПЗУ, ОЗУ, шинного формирователя и трех устройств ввода-вывода. В ПЗУ хранится программа управления видеопроцессором. Программы управления микропроцессорным модулем и обработки результатов ЦП передаются в микроЭВМ через одно из устройств ввода-вывода. ЦП имеет доступ к любому из микропроцессорных модулей. Дешифратор адреса служит для выбора нужных ячеек (микросхем) памяти и устройства ввода-вывода ЦП или микропроцессорного модуля. Шинный формирователь обеспечивает связь внутренних шин ЦП с системными шинами видеопроцессора.

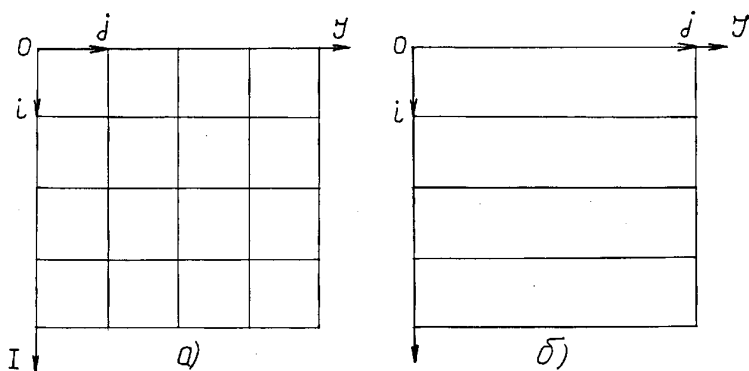


Рис. 2.19. Две возможные модификации кадра изображения, формируемого видеопроцессором: в виде матриц (а) и полос (б)

На рис. 2.19 показаны две возможные модификации кадра изображения, формируемого ВП: в виде матрицы (4×4 блока) и полос (4 блока). Если изображение представляется в виде матрицы, то для того, чтобы обеспечить «сшивание» линий, проходящих через разные матрицы или полосы, необходимо выполнить следующие условия:

$$\left| I_{i,j=N_3}^{K,N} - I_{i,j=0}^{K+1,N} \right| \leq 1; \quad (2.6)$$

$$\left| I_{i,j=N_3}^{K,N} - I_{i=0,j}^{K,N+1} \right| \leq 1, \quad (2.7)$$

где $I^{K,N}$ – координаты участка изображения; $I_{i,j}^{K,N}$ – координаты элемента кадра изображения; N_3 – число элементов разложения изображения в каждой матрице; $N = 0, \dots, 63$; i, j – текущие координаты элементов изображения; K, N – номера матриц (блоков) видеопроцессора, $K = N = 0, \dots, 3$.

Неравенство (2.6) отражает условие «сшивания» линий контура по горизонтали, а неравенство (2.7) – условие «сшивания» линий по вертикали.

сигналам БФС устанавливается величина рассогласования между ТИ и ЭИ. Аналоговый сигнал поступает от ДТИ через БМ и записывается в БФМ1 и БФМ2 по адресам, определяемым ФА. БОМЯ вычисляет и хранит среднее значение яркости ТИ и ЭИ. Полученный результат записывается в ФР. Далее ВП вычисляет один из следующих критериев:

$$\begin{aligned}
 I'_{n,m} &= \sum_{j=1}^{1-n} \sum_{i=1}^{1-m} \left| F_{j,i}^{\text{ЭИ}} - F_{j-1,i-m}^{\text{ТИ}} \right|; \\
 I''_{n,m} &= \sum_{j=1}^{1-n} \sum_{i=1}^{1-m} \left| F_{j,i}^{\text{ЭИ}} \times F_{j-n,i-m}^{\text{ТИ}} \right|; \\
 I'''_{n,m} &= \sum_{j=1}^{1-n} \sum_{i=1}^{1-m} \left(F_{j,i}^{\text{ЭИ}} \times F_{j-1,i-m}^{\text{ТИ}} \right),
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

где $F_{j,i}^{\text{ЭИ}}, F_{j-n,i-m}^{\text{ТИ}}$ – соответственно нормированные квадратные матрицы ТИ и ЭИ; i – размер стороны матриц; n, m – целые числа. Основные параметры этого ВП: размерность обрабатываемых изображений – 32×32 или 256×256 ; число градаций яркости 16; наибольшее время вычисления критерия близости для нулевого сдвига между ТИ и ЭИ – $5 \cdot 10^{-4}$ с (32×32 пикселей) и $4 \cdot 10^{-2}$ с (256×256 пикселей).

Т а б л и ц а 2.5

Основные функции СТЗ и аппаратные средства их реализации

Функция	Аппаратные средства
Регистрация изображения	Фотоприемники, линейки и матрицы фотоприемников, видеодатчики телевизионного типа
Кодирование	Фотореле, фотометрические преобразователи, аналого-цифровые преобразователи
Хранение	ЗУ с последовательной, параллельной или произвольной выборкой
Преобразование формы представления, обработка изображения	Видеопроцессоры, специализированные и универсальные микропроцессоры и микроЭВМ

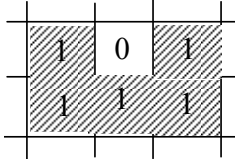
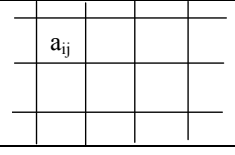
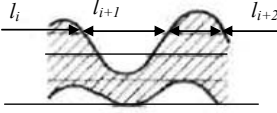
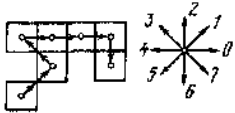
Отметим, что ВП последовательного типа реализует только три корреляционных алгоритма, а ВП параллельного типа – любое число алгоритмов.

Аппаратная реализация основных функций СТЗ осуществляется специализированными средствами, так как универсальные вычислительные средства не обеспечивают оптимальных способов хранения и обработки информации, а также требуемого быстродействия.

В табл. 2.5 приведены основные функции СТЗ и аппаратные средства их реализации.

Т а б л и ц а 2.6

Основные способы первичного кодирования изображения

Способ кодирования изображения	Условное представление	Способ реализации
Поэлементный бинарный: 101111 (бинарное)		Последовательное, параллельно-последовательное подключение к фотореле, к электронным релейным схемам
Поэлементный числовой: a_{ij} , ... (полутоновое)		Последовательное, параллельно-последовательное аналого-цифровое преобразование видеосигналов
С переменной длиной кода: $l_i, l_{i+1} \dots$ (контурное)		Подсчет временных интервалов (опорных импульсов) счетчиком, управляемым сигналами от фотореле, на вход которого подается видеосигнал
Цепное кодирование: 130006 (контурное)		Сочетание следящих устройств, например телевизионного типа, с анализаторами направления траектории слежения

В аппаратные средства СТЗ видеосигналы, несущие информацию об изображении, поступают последовательно, параллельно или

параллельно-последовательно во времени. Последовательный ввод видеосигнала осуществляется, например, при регистрации изображения датчиками телевизионного типа. Параллельно-последовательный ввод характерен для устройств с твердотельными приемниками изображения. Параллельный ввод осуществляется в мозаичных матричных устройствах.

Одной из важнейших функций аппаратных средств СТЗ является кодирование изображения. Основные способы первичного кодирования изображения представлены в табл. 2.6.

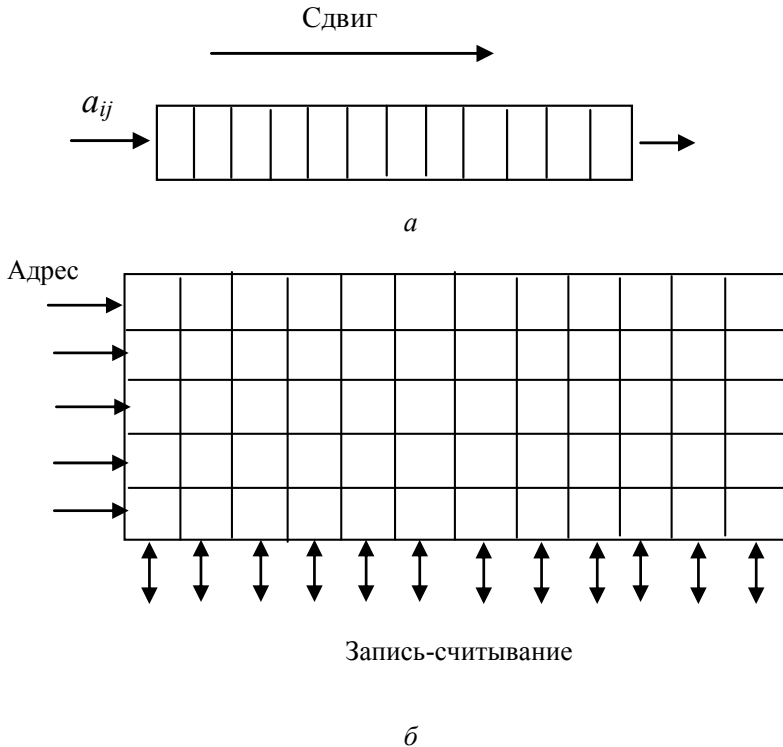


Рис. 2.21. Структуры ЗУ для хранения видеoinформации последовательного и матричного типа

Таблица 2.7

Основные виды обработки видеoinформации

Вид обработки	Условное представление	Типовые операции	Рекомендуемая структура видеопроцессора					
			матричная (клеточная)	пирамидальная (трехмерная)	конвейерная	сигистическая (волновая)	параллельная	мультипроцессорная
Операции между изображениями X и Y		Сложение, вычитание, сравнение	+	-	+	+	±	±
Простейшие операции над окрестностью определенного элемента		Фильтрация, увеличение, уменьшение, пороговая сегментация, свертка, сортировка, корреляция	+					
Повторные (рекурсивные) операции над окрестностью определенного элемента, отслеживание		Увеличение, уменьшение, сегментация, выделение точек, линий	+	±	+	-	±	±
Многоуровневые операции над данными с «пирамидальной» структурой		Быстрый «просмотр», сжатие-расширение, матричные операции	±	+	-	±	±	±
Операции высшего порядка над сложными закодированными или абстрагированными данными	-	Классификация, распознавание, интерпретация	-	-	-	-	+	+

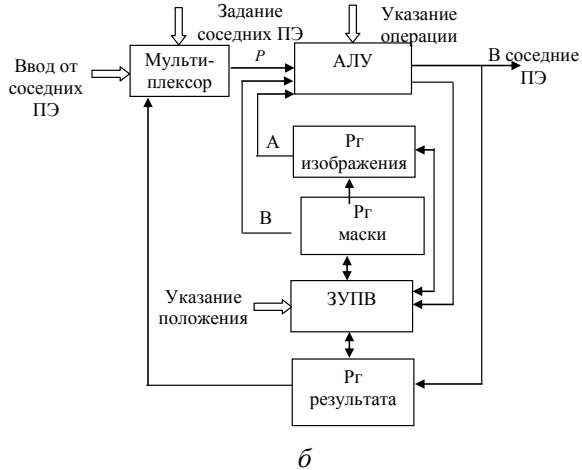
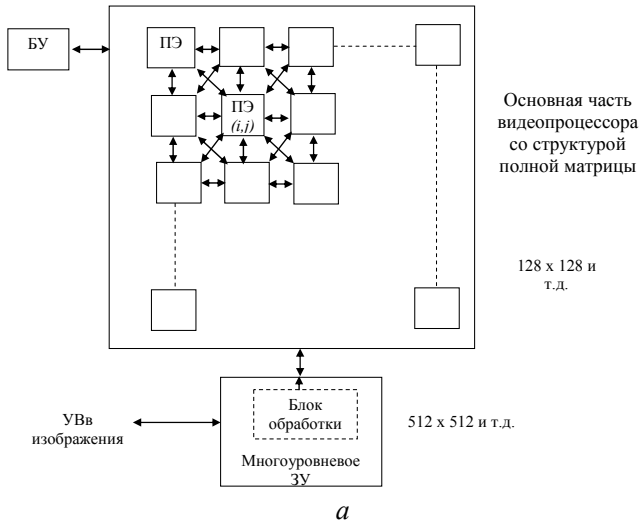


Рис. 2.22. Структуры матричного (клеточного) видеопроцессора и одного процессорного элемента: БУ – блок управления; ПЭ – процессорный элемент;

УВв – устройство ввода; АЛУ – арифметико-логическое устройство;

Rr – регистр; ЗУПВ – запоминающее устройство с произвольной выборкой

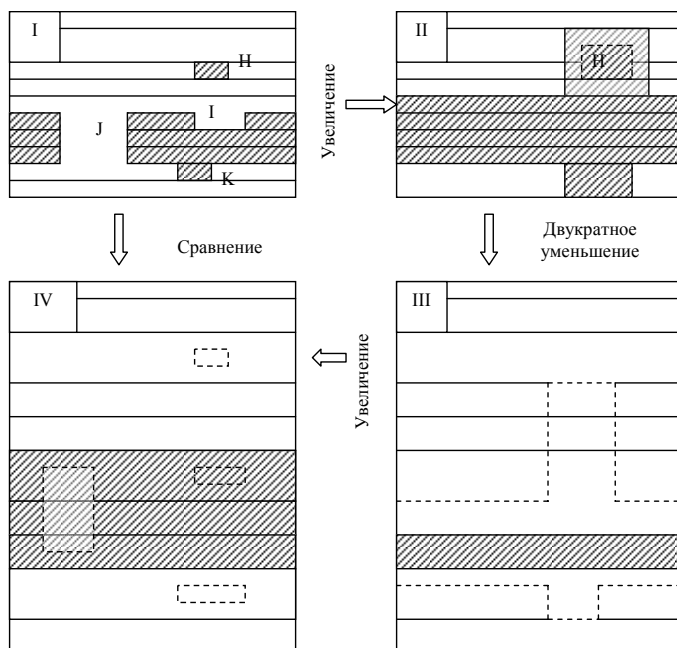


Рис. 2.23. Схема удаления «дефектов» и «шума»

Хранение видеоинформации осуществляется в ЗУ трех основных типов. В последовательных ЗУ (рис. 2.21, а) видеоинформация вводится поэлементно последовательно во времени и также считывается. В матричных ЗУ со словарной выборкой (рис. 2.21, б) запись и считывание информации осуществляются параллельно-последовательным способом (по строкам матрицы с заданным адресом – номером строки). В матричных ЗУ с произвольной выборкой возможны запись и считывание видеоинформации с произвольного элемента матрицы при задании его адреса.

Универсальные микропроцессоры и микроЭВМ в основном предназначены для обработки информации, представляемой в виде слов – бинарных кодов с длиной в 1, 2, 3, ... байт (1 байт равен 8 бит), что создает неудобства при обработке видеоинформации. В этой связи созданы специальные аппаратные и аппаратно-

программные средства – видеопроцессоры. Структура видеопроцессоров определяется реализуемыми видами обработки видеоинформации (табл. 2.7).

Видеопроцессор матричной (клеточной) структуры содержит двумерный массив процессорных элементов ПЭ (рис. 2.22, а) размерностью 4×4 , 8×8 , 16×16 , ..., 256×256 в зависимости от используемой технической базы. Видеоинформация в матричном представлении разбивается на блоки в соответствии с размерностью массива процессорных элементов и обрабатывается поблочко (по принципу *SIMD* – один поток команд, множество потоков данных).

Типовая структура процессорного элемента матричного видеопроцессора приведена на рис. 2.22, б. Алгоритм работы видеопроцессора рассмотрим на примере выполнения операции увеличения (фрагмент бинарного изображения 3×3 принимает значение «черный» – «1», если как минимум четыре соседних элемента центрального «черного» являются также «черными»).

В регистр маски из ЗУПВ вводится массив B (010101011), в регистр изображения из ЗУПВ вводятся массивы A , соответствующие фрагментам изображения ($x_1 \dots x_9$).

Арифметико-логическое устройство выполняет операцию

$$R \left\{ \begin{array}{l} (11111111), \text{ если поэлементная свертка} \\ \text{матриц } A \text{ и } B \text{ дает матрицу } B; \\ A, \text{ если поэлементная свертка матриц } A \text{ и } B \\ \text{не дает матрицу } B. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

В результате матричный видеопроцессор выполняет операцию увеличения. Аналогично выполняются операции уменьшения и сравнения, что дает возможность, например, удалить дефекты I, J и элементы шума H, K на изображении I полосы (рис. 2.23). В увеличенном изображении II устранены дефекты и слиты элементы шума с увеличенным исходным изображением. Двукратно уменьшенное изображение III не содержит элементов шума H, K . Окончательная операция (увеличение), совмещенная со сравнением с исходным искаженным изображением, восстанавливает неискаженное исходное изображение IV.

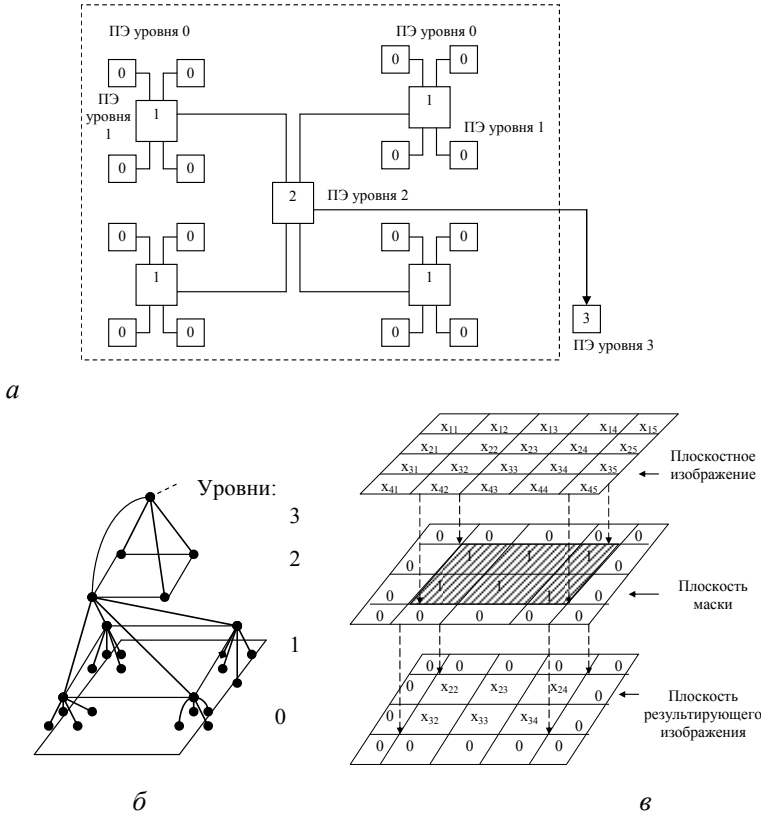


Рис. 2.24. Пирамидальная структура видеопроцессора и схема, поясняющая принцип выполнения простейших операций над изображениями в трехмерной процессорной структуре

Пирамидальная структура видеопроцессора (рис. 2.24, а) содержит несколько «слоев» процессорных матриц с межслойными связями (рис. 2.24, б). Если все процессорные слои имеют одинаковое число процессорных элементов, то реализуется «трехмерная» структура видеопроцессора, принцип действия которого поясняет рис. 2.24, в. Свертка элементов x_{11}, \dots, x_{45} плоскости изображения с элементами маски, содержащей фрагмент единичных элементов с

размерностью 3×2 , позволяет выделить в плоскости результирующего изображения фрагмент из элементов $x_{i,j}$ с той же размерностью 3×2 .

В конвейерных видеопроцессорах (рис. 2.25) процессорные элементы составляют последовательный ряд, поэтому они являются оптимальными для обработки изображений, представляемых растровой (построчной) разверткой.

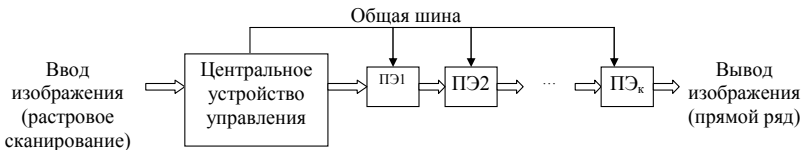


Рис. 2.25. Структура конвейерного видеопроцессора

Принцип работы конвейерного видеопроцессора, состоящего из четырех процессорных элементов ПЭ1–ПЭ4, поясняет алгоритм выполнения операции свертки матрицы 4×3 :

$$S(i) = A(i,1) + A(i,2) + A(i,3), \quad (2.11)$$

где $i = 1, 2, \dots, 4$; $A(i, j)$ – элементы исходной матрицы; $S(i)$ – элементы строки-свертки.

В каждом такте работы конвейера осуществляется ввод видеoinформации; операция суммирования; операция передачи информации между процессорными элементами.

Видеопроцессоры со систолической структурой содержат регулярную сеть процессорных элементов, каждый из которых работает циклически, чередуя прием и передачу видеoinформации, подобно элементам конвейерных видеопроцессоров. На рис. 2.26 приведена структура, реализующая, например, матричную операцию $D = A \cdot B + C$ за число тактов, соответствующее размерности матриц.

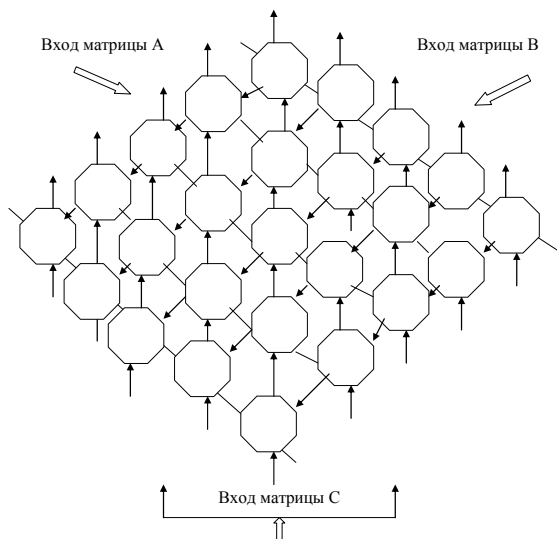


Рис. 2.26. Систолическая структура видеопроцессора

Видеопроцессоры с параллельной (рис. 2.27, а) структурой содержат ряд аппаратных специализированных процессоров для решения частных задач, связанных общей быстродействующей шиной передачи видеоинформации. Процессорные элементы выполняют свои функции параллельно во времени. Так как создание процессоров сопряжено со значительными аппаратными затратами, то видеоинформация обрабатывается по фрагментам.

Видеопроцессоры с мультимикропроцессорной структурой (рис. 2.27, б) позволяют реализовывать необходимое быстродействие путем объединения ряда универсальных микропроцессоров общей шиной, кольцевой шиной или коммутируемой сетью. Быстродействие видеопроцессоров принято измерять в единицах MOPS (*million of pixels persecond*) – миллион пикселей (элементов изображения) в секунду.

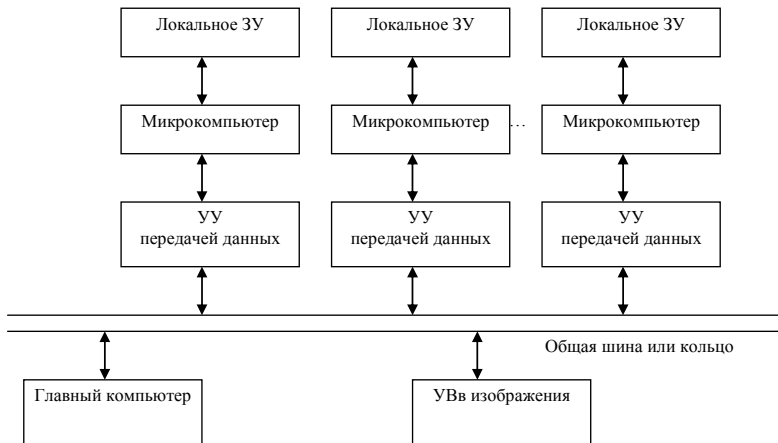
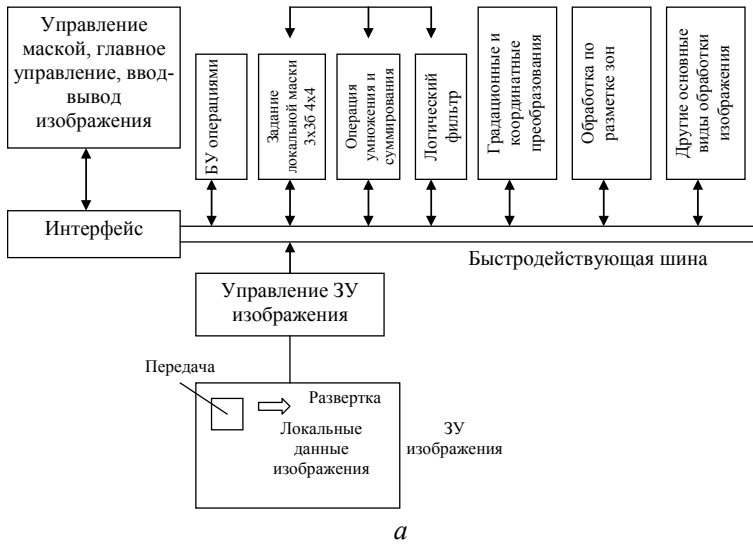


Рис. 2.27. Видеопроцессоры с параллельной и мультипроцессорной структурами

2.6. Буферные запоминающие устройства

Ниже описывается БЗУ, считываемое изображение с ТК, реализованное на фотодиодной матрице (рис. 2.28).

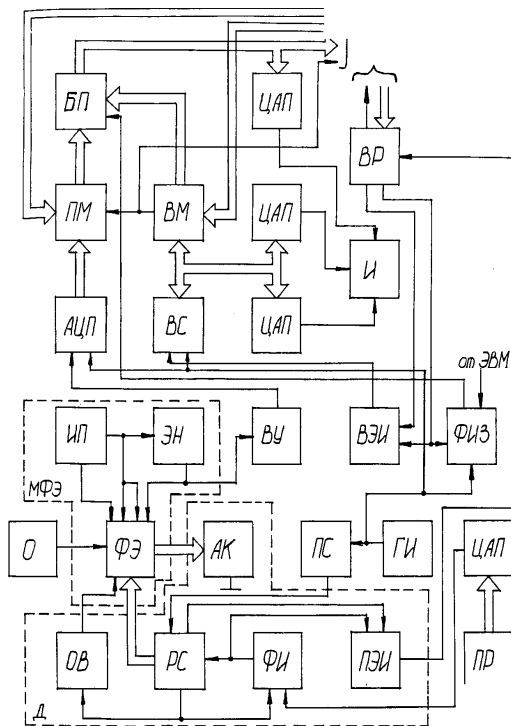


Рис. 2.28. Буферное запоминающее устройство на фотодиодной матрице для считывания среднеформатных полутонных изображений

БЗУ содержит следующие узлы: О – объектив; ФЭ – фотоприемный элемент; МФЭ – матрица фотоприемных элементов; АК – аналоговый ключ; ОБ – одновибратор; РС – регистр сдвига; ФИ – формирователь импульсов; ИП – источник питания; ПЭИ – первый элемент «И»; ВЭИ – второй элемент «И»; ЭН – элемент нагрузки; ВУ – видеусилитель; ПС – первый счетчик; ВС – второй счетчик; ГИ –

генератор импульсов; ПР – первый регистр; ВР – второй регистр; ФИЗ – формирователь импульсов записи; ПМ – первый мультиплексор; ВР – второй мультиплексор; БП – блок памяти; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; И – индикатор (видеоконтрольное устройство).

БЗУ работает следующим образом. На фоточувствительное поле ФЭ с помощью объектива О проектируется изображение выбранного участка рабочей зоны. Преобразование оптической информации в электрический сигнал производится с помощью ПС, РС и АК путем последовательного съема сигнала с каждого ФЭ строки матрицы. Требуемая частота работы АК, РС, ПС задается ГИ.

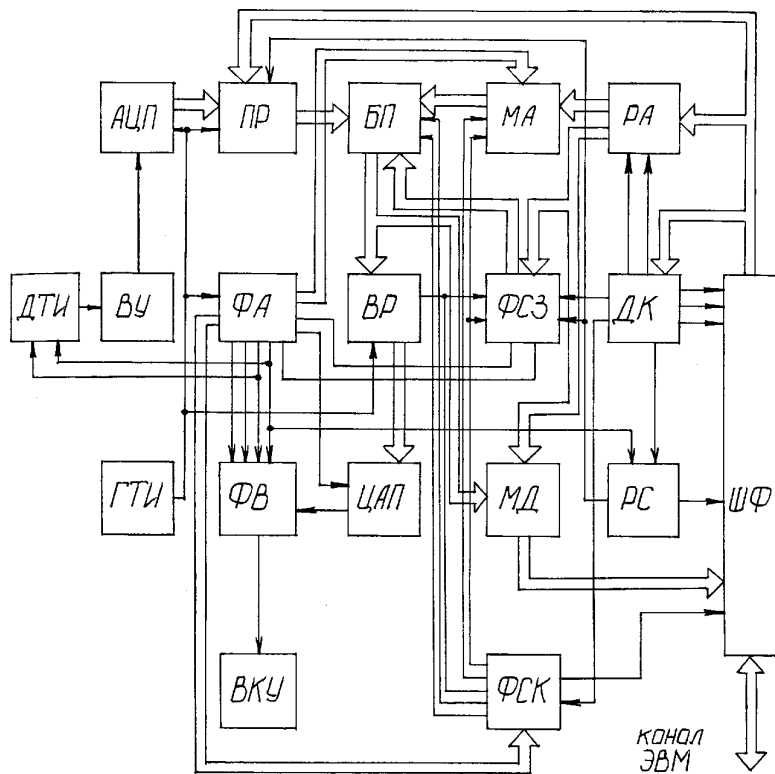


Рис. 2.29. Буферное запоминающее для считывания среднеформатных полутоновых изображений

После подключения последнего ФЭ последней строки матрицы ОВ производит «очистку» ячеек МФЭ. ФИ обеспечивает время накопления видеоинформации МФЭ, устанавливаемого ПР через ЦАП. ПР имеет также вход для осуществления операции «сброс». Видео-сигнал, снимаемый с ЭН (подключен, как и ФЭ, к ИП), оцифровывается АЦП. Запись информации в БП осуществляется по команде от ВР (через ФИЗ), расшифровывающей команды, поступающие по шине от ЭВМ.

Причем адрес в БП устанавливается ВМ, а управление режимами записи и сброса БП производится ФИЗ и ВЭИ. В режиме индикации информация (о координатах ячейки матрицы) с ВС поступает через соответствующие ЦАП на И, на третий вход которой подается видеосигнал с ЦАП. При выводе информации на ЭВМ (на индикатор) на ФИЗ подается команда «вывод» (от ЭВМ), по которой формируется импульс записи, поступающий на БП. При этом соответствующим образом управляются ПМ, ВМ. Таким образом, БЗУ позволяет считывать (в память и далее в ЭВМ) малоформатное полутоновое изображение (32×32), индексировать на индикаторе изображение и выводить из ЭВМ на экран индикатора обработанное изображение.

Дальнейшим развитием БЗУ является разработка устройств, обеспечивающих считывание среднеформатных изображений (256×256) и работающих с телевизионными камерами на ПЗС-матрице или видиконе. Ниже описывается вариант такого БЗУ. Устройство содержит следующие узлы (рис. 2.29): ДТИ – датчик ТИ; ВУ – видеоусилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ПР – первый регистр; ФСЗ – формирователь сигналов записи; ФА – формирователь адреса; БП – блок памяти; ВР – второй регистр; МД – мультиплексор данных; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ФВ – формирователь видеосигнала; РС – регистр состояний; МА – мультиплексор адреса; ФСК – формирователь сигналов команд; ДК – дешифратор команд; РА – регистр адреса; ШФ – шинный формирователь; ВКУ – видеоконтрольное устройство.

Принцип действия данного БЗУ во многом аналогичен предыдущему устройству. БЗУ имеет четыре следующих режима: режим контроля записанной в блоке памяти информации, режим записи кадра, режим выборки информации из блока памяти в ЭВМ и режим

записи информации из ЭВМ в блок памяти. Устройство в исходном состоянии находится в режиме контроля. Остальные три режима могут быть в нужное время включены с помощью ЭВМ. После окончания записи кадра или обмена информацией с ЭВМ устройство автоматически переходит в режим контроля.

Видеоинформация с ДТИ с помощью ВУ, АЦП и ПР записывается в БП. Управляет записью кадра изображения в БП ЭВМ через ДК, РС, ФСЗ и ПР. При этом ПР преобразовывает последовательную цифровую информацию в параллельную. Во время преобразования последовательной информации в параллельную ФСК подает на БП сигналы, необходимые для записи, а ФА, вырабатывающий 14-разрядный адрес, через МА осуществляет последовательную коммутацию (по семь разрядов) на адресные входы БП. ПР, ФА и ФСЗ синхронизируются сигналом, поступающим с ГТИ. По окончании полукadra, по приходу на РС следующего кадрового синхроимпульса, РГ снимает сигнал с ФСЗ и ПР и БЗУ автоматически переходит в режим контроля.

В режиме контроля информация о четырех элементах изображения параллельно считывается из БП, а затем с помощью ВР параллельная комбинация чисел преобразуется и подается на ЦАП, выходной сигнал которого суммируется ФВ с синхроимпульсами и гасящими импульсами, поступающими из ФА. По команде от ДК (на ФСК и ШФ) информация из БП считывается в ЭВМ через МД и ШФ. При этом МД выбирает сигналы в зависимости от двух младших разрядов адреса столбцов, с одной из четырех групп микросхем БП. Адрес для считывания устанавливается МА, использующим информацию от РА.

При записи данных в БП из ЭВМ работа устройства аналогична считыванию за исключением того, что ДК не выдает сигнал на ШФ, подключающий выход МД на шину ЭВМ. Кроме того, ДК выдает сигнал на ФСЗ, по которому на выбранную двумя младшими разрядами адреса столбцов, поступающих на ФСЗ, группу микросхем выдается сигнал записи. Данные на БП поступают от ШФ через РА. Адрес в РА заносится предварительно из канала ЭВМ.

Запись информации из ДТИ в память БЗУ происходит за 0,02 с. Дальнейшее усовершенствование этого БЗУ представлено в трех модификациях. Первая модификация БЗУ позволяет подключать до четырех телевизионных камер и записывать в блок памяти четыре

кадра ТИ размерностью 256×256 элементов или один кадр ТИ размерностью 512×512 элементов. Вторая и третья модификации БЗУ обеспечивают соответственно считывание ТИ размерностью 512×512 или 1024×1024 пикселя и 256 градациями яркости.

Одним из путей сжатия видеоинформации является преобразование обычного изображения в контурное. Ниже описываются два варианта БЗУ, считывающих контурные изображения.

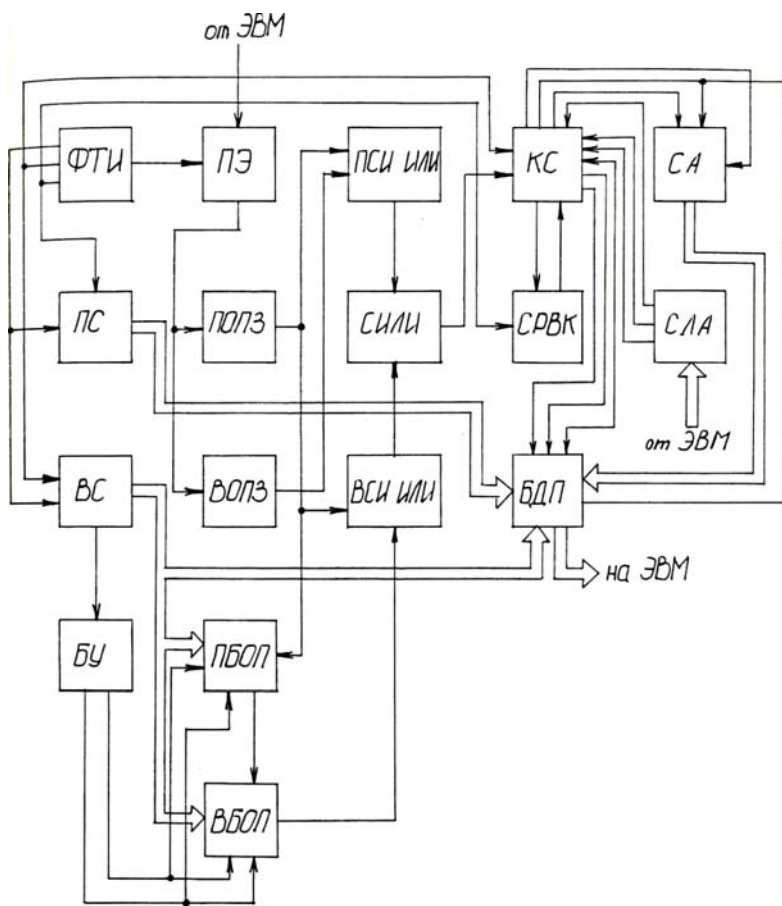


Рис. 2.30. Структурная схема БЗУ, считывающая контурные изображения

На рис. 2.30 дана структурная схема контурного БЗУ, считывающего один кадр ТИ за 0,02 с. БЗУ содержит следующие изделия: ДТИ – датчик ТИ; ПЭ – пороговый элемент; ПОПЗ – первый одновибратор с повторным запуском; ВОПЗ – второй одновибратор с повторным запуском; ПСИ ИЛИ – первая схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; ВСИ ИЛИ – вторая схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; ПБОП – первый блок оперативной памяти; СИЛИ – схема ИЛИ; КС – командная схема; ВБОП – второй блок оперативной памяти; ПС – первый счетчик; СРВК – схема разрешения выборки кадра; ВС – второй счетчик; БУ – блок управления; БДП – блок двумерной памяти; СА – схема адресации; СЛА – схема логики адреса.

Устройство работает в следующих режимах, задаваемых КС СА: а) сброс СА; б) стирание БДП; в) запись информации (о контурах изображения объекта) в БДП; г) чтение из БДП.

В режиме сброса БЗУ в исходное состояние сбрасываются счетчики СА. В режиме записи устройство работает синхронно с ДТИ. Пороговый уровень видеосигнала (уровень бинаризации) задается ЭВМ. ПОПЗ и ВОПЗ обеспечивают расширение каждого импульса из пачки так, что реализации сигналов на выходах ПОПЗ и ВОПЗ оказываются сдвинутыми на длительность одного импульса в пачке. После этого на выходе ПСИ ИЛИ формируется сигнал, характеризующий вертикальные границы изображения объектов. Запись сигналов в ПБОП и чтение сигналов из ВБОП производятся синхронно с информационной частью строки, а чтение информации из ПБОП и запись информации в ВБОП производятся в период отсутствия информации (сигнала) на строке. Таким образом, в режиме чтения из ВБОП информация на ее выходе задержана на длительность одной строки. В результате работы ВСИ ИЛИ производится выделение несовпадающих частей реализации сигналов на двух соседних строках, а в итоге происходит формирование горизонтальных частей контуров объекта. Таким образом, на выходе СИЛИ будем иметь сигнал, характеризующий контуры изображения объектов.

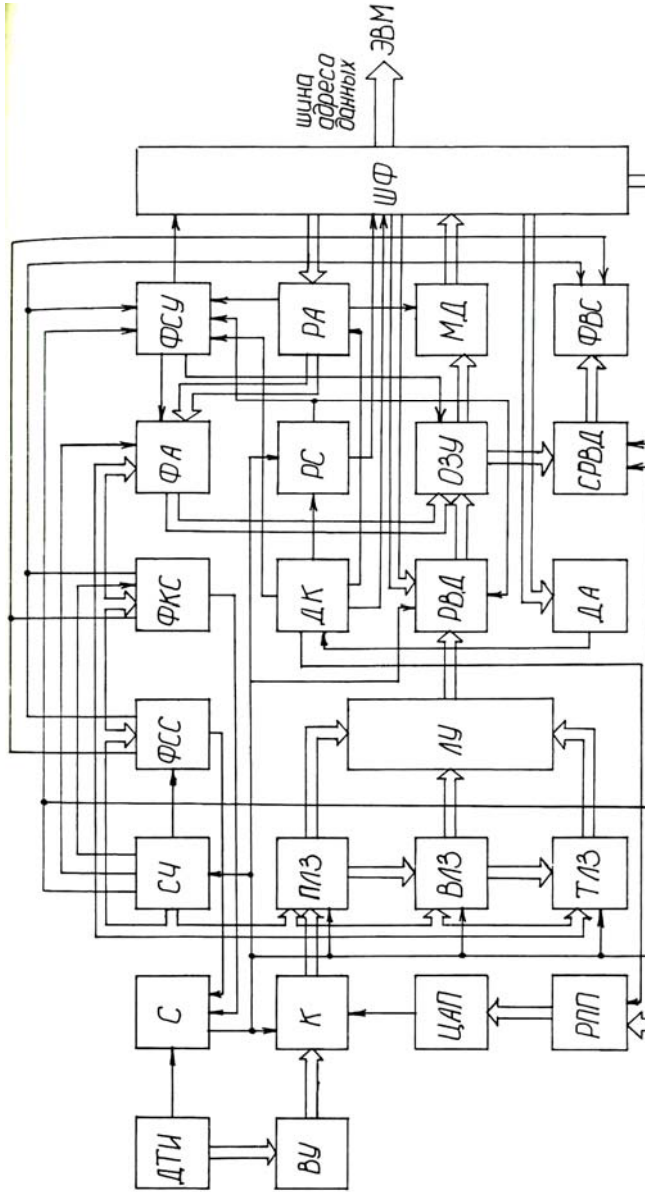


Рис. 2.31. Структурная схема БЗУ, считывающего контурные изображения

Эта информация записывается через СРВК и КС в БДП. Состояние КС задается через СЛА от микроЭВМ. Выборка информации из БДП производится после сброса СА в исходное состояние.

Отличие описанного БЗУ от известных в том, что за один кадр считывается вся информация о контурах объектов ТИ.

Дальнейшим развитием этого БЗУ является устройство, позволяющее считывать несколько кадров изображения.

Основной недостаток описанных выше БЗУ, заключающийся в неспособности устройства выделять границы элементов изображения, ориентированные горизонтально по строке, устраняется БЗУ, структурная схема которого приведена на рис. 2.31.

БЗУ параллельно выполняет следующие функции: ввод бинарного изображения с ТК в формате 256×256 элементов, локальную фильтрацию изображения окном 3×3 элемента, выделение контуров изображения, вывод бинарного изображения на экран монитора в формате 256×256 элементов.

БЗУ содержит следующие узлы: ДТИ – датчик ТИ; ВУ – видеосигнальный усилитель; К – компаратор; С – синхрогенератор; Сч – счетчик; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ПЛЗ, ВЛЗ, ТЛЗ – первая, вторая и третья линии задержки; РПП – регистр переключения порога; ЛУ – логическое устройство; ФСС – формирователь строчных синхроимпульсов; ФКС – формирователь кадровых синхроимпульсов; ДК – дешифратор команд; ДА – дешифратор адреса; РС – регистр состояний; РА – регистр адреса; РВД – регистр ввода данных; СРВД – сдвиговый регистр ввода данных; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ФА – формирователь адреса; ФСУ – формирователь сигналов управления; МД – мультиплексор данных; ФВС – формирователь видеосигнала; ШФ – шинный формирователь.

БЗУ работает со стандартным видеосигналом, поступающим с телевизионной камеры (ДТИ) через ВУ на К. Кадровые и строчные синхроимпульсы подаются на синхрогенератор, который вместе с Сч обеспечивает работу БЗУ. Принцип действия фильтрующего «окна», использованного в БЗУ, основан, во-первых, на организации матрицы 3×3 элемента разложения изображения, во-вторых, анализе (сравнении значения яркости элемента «окна» с пороговым значением) и, в-третьих, устранении («обнулении») неинформативных элементов изображения. Для этого в БЗУ включены три ЛЗ. Для создания матрицы 3×3 (3 столбца по 3 строки) необходимо, чтобы в пер-

вой ЛЗ сигнал развертки запоминался (задерживался) на 3 элемента разложения, во второй и третьей ЛЗ – последовательно на время длительности развертки строки матрицы разложения.

Т а б л и ц а 2.8

Характеристики буферных запоминающих устройств

№ п/п	Рисунок	Число элементов разложения изображения	Число градаций яркости изображения	Число записываемых кадров	Число подключаемых телекамер	Время считывания кадра, с	Тип датчика ТИ фотоприемника	Примечание
1	2.28	32×32	16	1	1	0,02	Фотодиодная матрица	Полутонное ТИ
2	2.29	256×256	64	1	1	0,02	Видикон, ПЗС-матрица	Полутонное ТИ
3	2.29	512×512	16	1	1	0,02	ПЗС-матрица	Полутонное ТИ
		256×256	16	4	4	0,08		
4	2.29	512×512	256	1	1	0,02	ПЗС-матрица, видикон	Полутонное ТИ
5		1024×1024	256	1	1	2,8		
6	2.30	256×256	2	1	1	0,02	ПЗС-матрица	Контурное ТИ
7	2.30	256×256	2	Определяется задачей	1	0,02	ПЗС-матрица	Контурное ТИ
8	2.31	256×256	2	1	1	0,04	ПЗС-матрица	Контурное ТИ

Далее с помощью ЛУ, использующего сигналы со всех ЛЗ, производится сравнение значения яркости элемента фильтрующего «окна» с пороговым значением и обнуление неинформативных элементов изображения. Сформированный таким образом сигнал, характеризующий контур изображений, может записываться через РВД в ОЗУ; этот же сигнал может записываться в ОЗУ ЭВМ и выводиться на контрольный монитор. В последнем случае видеосигнал подается из ОЗУ в СРВД, который преобразует параллельный код в

последовательный, а затем – в ФВС, обеспечивающий подачу информативного сигнала на монитор. Для создания раstra на экране монитора формируются синхроимпульсы с помощью ФСС и ФКС. Их работа полностью зависит от состояния Сч. ШФ выполняет роль формирователя сигналов ввода-вывода информации и сигналов управления.

БЗУ обеспечивает возможность работы ОЗУ как с ЭВМ, так и автономно. Переключение режимов работы осуществляется ФА, которым управляет ФСУ. Этот блок также управляет ОЗУ.

ФСУ может работать как в автоматическом режиме (в зависимости от состояния синхронизатора), так и по командам ЭВМ. Этой цели служит ДК, который управляет также РА, РПП, РС, ФСУ.

Характеристики описанных выше БЗУ приведены в табл. 2.8.

2.7. Электронные диски памяти

Электронный диск. ЭД содержит следующие узлы (рис. 2.32): ШФ – шинный формирователь; ГТИ – генератор тактовых импульсов; САСР – счетчик адресов строк регенерации; РАСТ – регистр адреса строк; РАСЕ – регистр адреса столбцов; РАК – регистр адреса кадра; БМУ – блок местного управления; ТР – триггер регенерации; МА – мультиплексор адреса; ФСР – формирователь сигналов **RAS**; ФР – формирователь сигналов разрешения **CAS** и **WR**; ФСК – формирователь сигналов **CAS**; БОП – блок оперативной памяти; ФСЗ – формирователь сигналов **WR**.

ЭД имеет три режима работы: а) регенерации информации, записанной в БОП; б) записи информации из ЭВМ в БОП; в) выборки (чтения) информации из БОП в ЭВМ. Устройство в исходном состоянии находится в режиме регенерации «а». Работа ЭД в режиме регенерации характеризуется отсутствием сигнала – «Обращение к БОП», когда ТР запрещает формирование сигналов **CAS** и **WR**, разрешает тактирование САСР при поступлении на его синхровход тактовых импульсов с ГТИ, переключает МА на выдачу адреса, сформированного САСР, и разрешает прохождение тактовых импульсов с ГТИ на вход ФСР, формирующего минимальный интервал между сигналами **RAS**, поступающими на одноименные входы всех микросхем БОП. С формированием сигнала **RAS** завершается цикл реге-

нерации строки, адрес которой поступает на входы разрядов адреса А₀...А₇ БОП через МА из САСР.

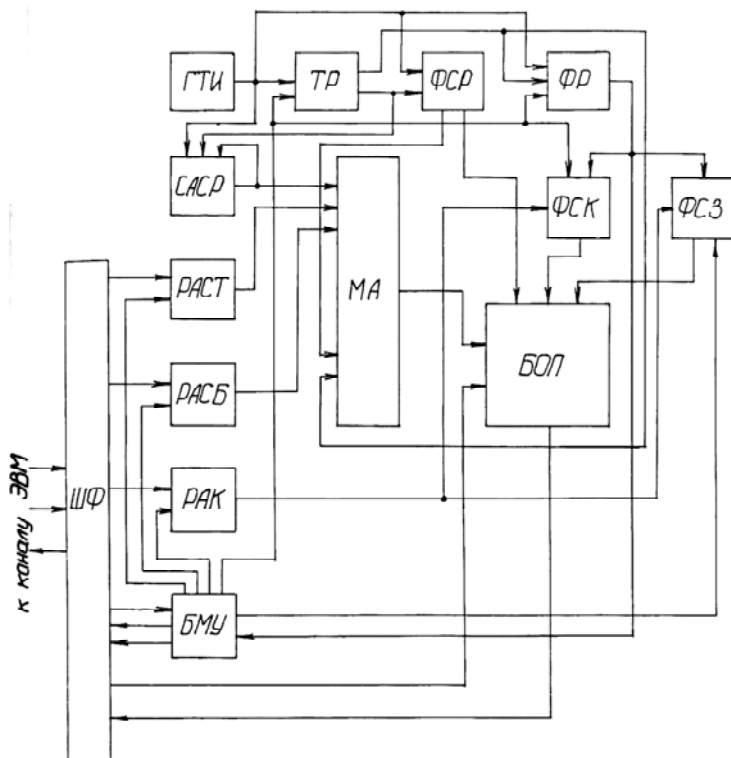


Рис. 2.32. Структурная схема электронного диска

При обмене ЭД с ЭВМ (режимы «б» и «в») адреса кадра, строки и столбца, к которым происходит обращение, предварительно заносятся ЭВМ в РАК, РАСТ и РАСБ соответственно. При этом ЭД находится в режиме регенерации. Для записи или чтения информации из БОП ЭВМ должна обратиться к регистру данных.

В режиме записи информации из ЭВМ в БОП блок местного управления БМУ вырабатывает сигнал «Обращение к БОП», который поступает на ТР, ФР, ФСК, и сигнал **WR**, поступающий на ФСЗ.

По передним и задним фронтам тактовых импульсов, поступающих с ГТИ, осуществляется управление работой БОП, САСР, МА, РАСТ, ФР, ФСК, ФСЗ и БМУ.

Режим чтения информации из БОП в ЭВМ аналогичен режиму записи. Отличие состоит в том, что сигнал **WR** не вырабатывается, а на ШФ поступает с БМУ сигнал, разрешающий передачу данных из БОП в канал ЭВМ.

Основные технические характеристики ЭД: информационная емкость (4-разрядных слов) – 512 К; организация (кадров × строк × столбцов) – 8×256×256; напряжение питания – 5 В; ток потребления – не более 1,5 А; размеры (252×143×12) мм; масса – не более 0,5 кг.

Таким образом, ЭД обладает возможностью запоминать до восьми кадров ЭИ, а также имеет малые габариты и массу. Это выгодно отличает ЭД от известных электронных дисков.

Реализация других блоков цифровой СТЗ (блок адаптации, интерфейс, блоки управления осветителями и фильтром, блок осветителей, светофильтры) проста и зависит от назначения КСТЗ.

2.8. Датчики очувствления

Рассмотрим датчики очувствления роботов в ближней и сверхближней зонах, обычно выдающие дискретный пороговый сигнал, который определяет наличие объекта в пределах установленного пространства, например при захвате объекта или при его обходе.

Существует несколько методов очувствления роботов в ближней и сверхближней зонах [3].

2.8.1. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики – датчики, основанные на изменении индуктивности при взаимодействии с металлическим объектом, наиболее широко используются в промышленных роботах. Принцип работы этих датчиков можно объяснить по рис. 2.33. На рис. 2.33, *а* представлена схема индуктивного датчика, который состоит из катушки, размещенной за постоянным магнитом в корпусе. Когда датчик приближается к ферромагнитному материалу, изменяется расположение силовых линий постоянного магнита (рис. 2.33, *б, в*).

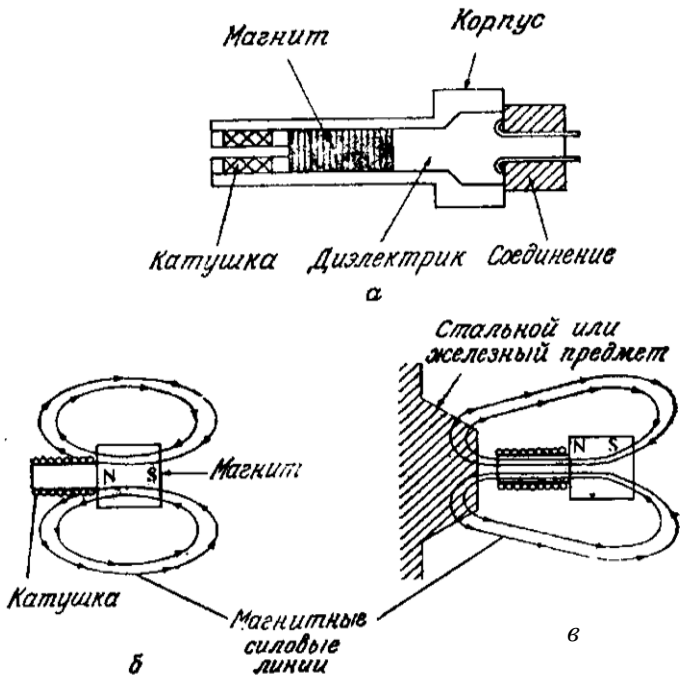
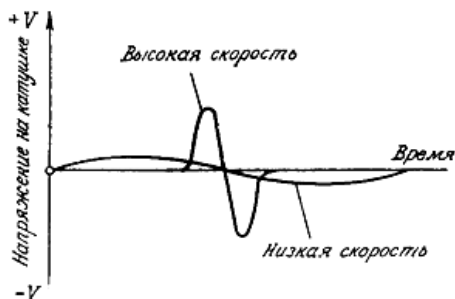


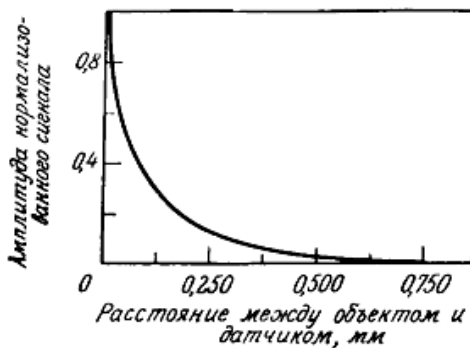
Рис. 2.33. Индуктивный датчик (а), форма магнитных линий при отсутствии ферромагнетика (б) и при наличии ферромагнетика в зоне измерения датчика (в)

При отсутствии движения силовые линии не изменяются и, следовательно, в катушке ток не индуцируется. Изменение напряжения на выходе катушки обеспечивает эффективное ощущение в ближней зоне на расстояниях ~ 1 мм (рис. 2.34).

Так как для получения выходного сигнала на датчике требуется наличие относительного движения датчика и объекта, одним из методов получения дискретного порогового сигнала является интегрирование выходного сигнала.



а



б

Рис. 2.34. Зависимость выходного сигнала индуктивного датчика от скорости

Пороговый сигнал остается на нижнем уровне, пока значение интеграла остается ниже установленного порога. После превышения порога сигнал переходит на верхний уровень, что соответствует наличию объекта в зоне измерения.

2.8.2. Датчики Холла

Эффект Холла связывает напряжение между двумя точками в проводнике или полупроводниковом материале в магнитном поле, воздействующем на этот материал. Используемые сами по себе датчики Холла могут уловить только намагниченные объекты. Однако

если их использовать вместе с постоянным магнитом (рис. 2.33), они способны установить наличие всех ферромагнитных материалов.

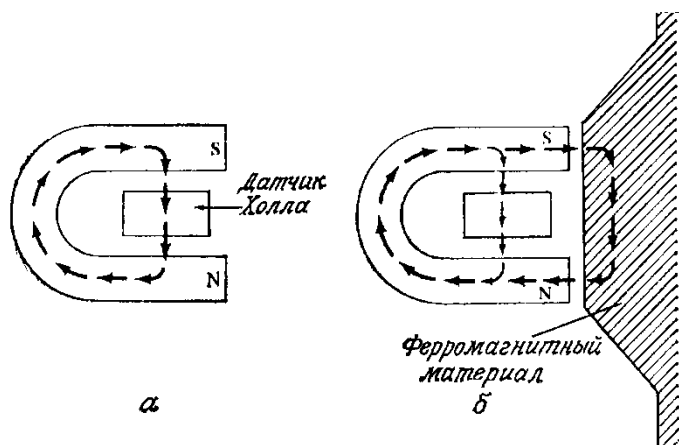


Рис. 2.35. Работа датчика Холла (а), снабженного постоянным магнитом (б)

Датчики Холла основаны на возникновении силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Эта сила направлена по оси, перпендикулярной плоскости, образованной направлением движения заряженной частицы и направлением поля. Сила Лоренца определяется как $F = q(v \times B)$, где q – заряд; v – вектор скорости; B – вектор магнитного поля; \times – знак пересечения векторов. Предположим, что ток проходит через полупроводник n -типа, который находится в магнитном поле (рис. 2.36). Поскольку электроны являются основными носителями в материалах n -типа, а движение дырочного тока противоположно потоку электронов, сила, действующая на движущиеся отрицательно заряженные частицы, имеет направление, показанное на рис. 2.36. Эта сила действует на электроны, которые скапливаются в нижней части материала. При внесении ферромагнетика в зону действия датчика Холла напряженность магнитного поля увеличивается, а сила Лоренца уменьшается. На полупроводнике возникает падение напряжения.

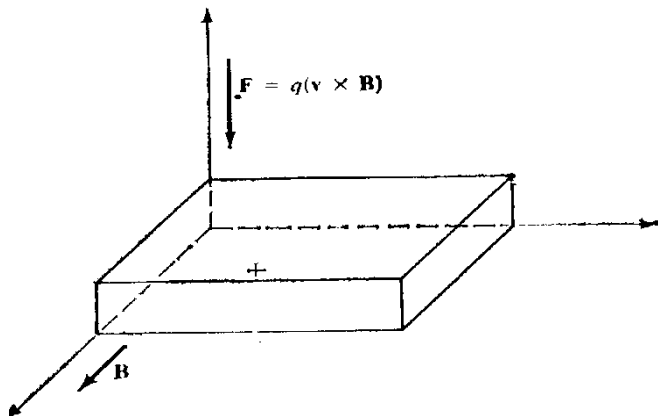


Рис. 2.36. Возникновение эффекта Холла

Дискретный выходной сигнал, определяющий наличие объекта, реализуется пороговым ограничителем выходного напряжения датчика.

В качестве чувствительного элемента используется кремний, имеющий ряд преимуществ: малые размеры, высокую чувствительность, устойчивость к влиянию электрических помех, возможность использования электронного усилителя и обработки сигналов непосредственно на датчике, уменьшая тем самым размеры и стоимость.

2.8.3. Емкостные датчики

Емкостные датчики обладают способностью обнаруживать все твердые и жидкие материалы. Как видно из названия, эти датчики основаны на изменении емкости, которая зависит от расстояния до поверхности объекта в зоне действия чувствительного элемента (рис. 2.37).

Существует ряд методов обнаружения в ближней зоне, основанный на изменении емкости:

– конденсатор представляет собой элемент колебательного контура, колебания в котором возникают только в том случае, если емкость датчика превышает заданное пороговое значение. Колебания преобразуются затем в выходное напряжение, которое указывает на

присутствие объекта в зоне измерения. Этот метод обеспечивает дискретный выходной сигнал, переключение которого зависит от значения заданного порога;

– емкостный элемент в контуре, по которому постоянно проходит синусоидальный сигнал частоты. Изменение емкости вызывает фазовый сдвиг между сигналом эталонной частоты и сигналом от емкостного элемента. Фазовый сдвиг пропорционален изменению емкости и, следовательно, может быть использован для обнаружения объекта в ближней зоне.

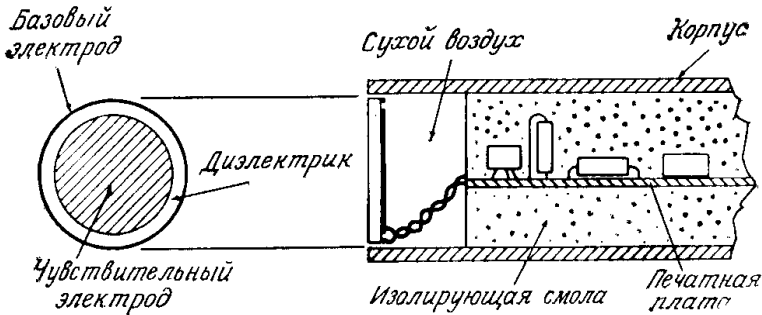
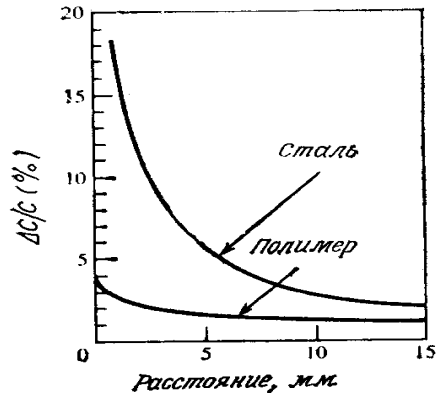


Рис. 2.37. Емкостный датчик измерения в ближней зоне

На рис. 2.38 показано изменение емкости в зависимости от расстояния.

Рис. 2.38. Зависимость процентного изменения емкости датчика в ближней зоне от расстояния



Форма характеристики зависит от материала объекта измерения. Обычно такие датчики работают в дискретном пороговом режиме. Изменение емкости выше заданного порога T соответствует наличию объекта, а ниже – его отсутствию в зоне, установленной величиной T .

2.8.4. Ультразвуковые датчики

Характеристики всех рассмотренных датчиков измерения в ближней зоне сильно зависят от материала объектов измерения. Эта зависимость может быть в значительной степени уменьшена путем использования ультразвуковых датчиков (рис. 2.39).

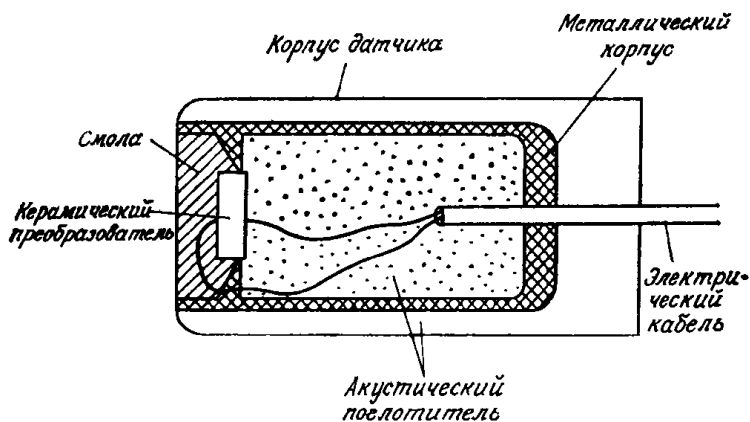


Рис. 2.39. Ультразвуковой датчик измерения в ближней зоне

Основным элементом датчика является электроакустический преобразователь, в качестве которого часто используется пьезоэлектрический керамический элемент. Подложка из смолы защищает преобразователь от влажности, пыли и других внешних воздействий. Она служит также как переходное акустическое сопротивление. Поскольку один и тот же преобразователь используется обычно как для передачи, так и приема сигналов, для обнаружения объектов в ближней зоне необходимо быстрое демпфирование акустической

энергии. Это достигается путем применения акустических поглотителей и развязкой преобразователя от корпуса. Конструкция корпуса позволяет получить узкий акустический поток, дающий мощный направленный сигнал.

Для лучшего понимания работы ультразвукового датчика измерителя в ближней зоне надо провести анализ сигналов, используемых как для передачи, так и для приема акустической энергии (рис. 2.40).

Сигнал А является запорным сигналом, используемым для управления посылаемыми сигналами.

Сигнал В содержит выходной и отраженный сигналы.

Сигнал С выделяет сигналы передачи или приема. Для того чтобы установить различие между посылаемыми и принимаемыми сигналами, вводятся временные окна (сигнал **D**). Временной интервал Δt является минимальным временем измерения, а $\Delta t_1 + \Delta t_2$ – максимальным. Эти временные интервалы соответствуют прохождению определенных расстояний со скоростью распространения звука в используемой рабочей среде.

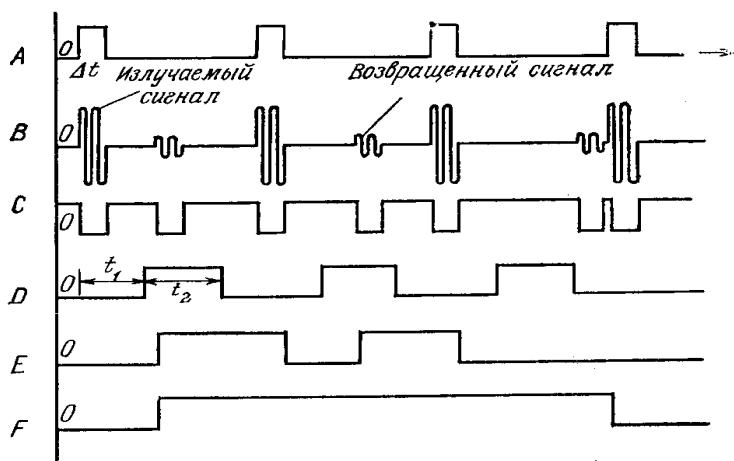


Рис. 2.40. Сигналы, используемые в ультразвуковом датчике измерения в ближней зоне

После получения отраженного сигнала (в то время, когда сигнал D имеет максимальное значение) вырабатывается сигнал E , величина которого принимает нулевое значение после окончания действия передающего импульса A .

Сигнал F вырабатывается при появлении положительного импульса E и сбрасывается в случае отсутствия сигнала E и появления импульса A .

Таким образом, сигнал F будет иметь максимальное значение при наличии объекта на расстоянии, определяемом параметрами сигнала D , т.е. сигнал F является выходным сигналом ультразвукового датчика, работающего в бинарном режиме.

2.8.5. Оптические датчики измерения в ближней зоне

Оптические датчики измерения в ближней зоне подобны ультразвуковым датчикам в том смысле, что они определяют близость объекта по его влиянию на волновой сигнал, проходящий от источника к приемнику. Один из наиболее распространенных методов измерения расстояния в ближней зоне с помощью оптических средств показан на рис. 2.41.

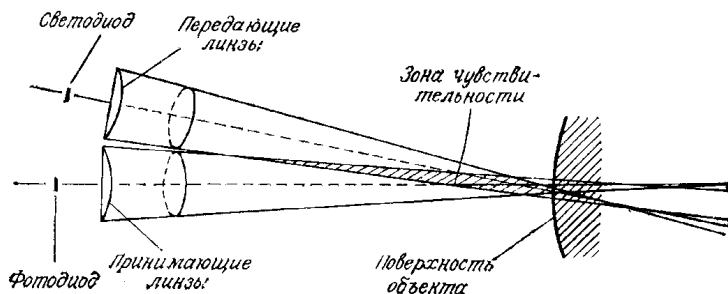


Рис. 2.41. Оптический датчик измерения в ближней зоне

Датчик состоит из светодиода, который выполняет роль источника инфракрасного излучения, и фотодиода, используемого в качестве приемника. Пучки света, сформированные оптическими системами источника и приемника в одной плоскости, пересекаются в

вытянутой конусовидной зоне. Эта зона определяет рабочий диапазон датчика, так как отражающая поверхность, которая находится в зоне, освещается источником и одновременно «просматривается» приемником.

Хотя данный метод в принципе похож на метод триангуляции, имеются и различия. Зона измерений (см. рис. 2.41) обеспечивает не только точечное измерение. Поверхность, находящаяся в любом месте указанной зоны, будет идентифицирована. Для объекта с известной ориентацией и характеристиками отражения можно осуществить калибровку интенсивности изображения в функции расстояния, однако обычно систему используют в режиме, при котором формируется дискретный выходной сигнал при достижении интенсивности отраженного светового потока определенного порогового значения.

2.8.6. *Тактильные датчики*

Тактильные датчики используются в робототехнике для получения информации о контакте манипулятора с объектами в рабочем пространстве. Тактильная информация может использоваться, например, для определения местоположения объекта или его распознавания, а также для управления усилием захватного устройства, воздействующего на объект манипулирования.

Отличительной особенностью тактильных датчиков является то, что в процессе работы к ним могут быть приложены значительные статические и динамические нагрузки. В то же время для обеспечения осторожной работы с объектами зачастую требуется измерение малых усилий. Наибольшее распространение имеют два метода измерения усилий: 1) преобразование усилия в деформацию чувствительного элемента, 2) преобразование усилия в перемещение подвижной части чувствительного элемента. Исходя из требований большой перегрузочной способности и износоустойчивости, рабочая поверхность датчика должна удовлетворять требованию высокой механической прочности.

Тактильные датчики подразделяются на два основных типа: **дискретные** и **аналоговые**. Дискретные датчики, как правило, срабатывают при наличии или отсутствии объекта, в то время как вы-

ходной сигнал аналоговых датчиков пропорционален прикладываемому усилию.

2.8.7. Дискретные пороговые датчики

Дискретные тактильные датчики являются контактными приборами типа микропереключателей. В простейшем случае переключатель размещен на внутренней поверхности каждого пальца манипулятора (рис. 2.42).

Этот вариант очувствления используется для определения наличия детали между пальцами схвата. Перемещая манипулятор над объектом и последовательно производя контактирование с его поверхностью, можно также осуществить центрирование манипулятора относительно объекта для его схвата и переноса.

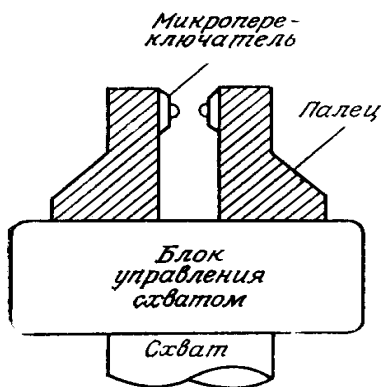


Рис. 2.42. Простой схват робота с бинарными тактильными датчиками

Путем размещения нескольких дискретных тактильных датчиков на внутренней поверхности каждого пальца схвата достигается расширение получаемого объема информации. Кроме того, они часто ставятся на внешней поверхности конечного звена манипулятора для получения управляющих сигналов, используемых при формировании траектории движения манипулятора в рабочем пространстве («ощупывание»).

2.8.8. Аналоговые датчики

Аналоговый тактильный датчик является регистрирующим прибором, выходной сигнал которого пропорционален прикладываемой силе. Простейший из таких приборов состоит из подпружиненного стержня (рис. 2.43), который механически связан с вращающейся осью.

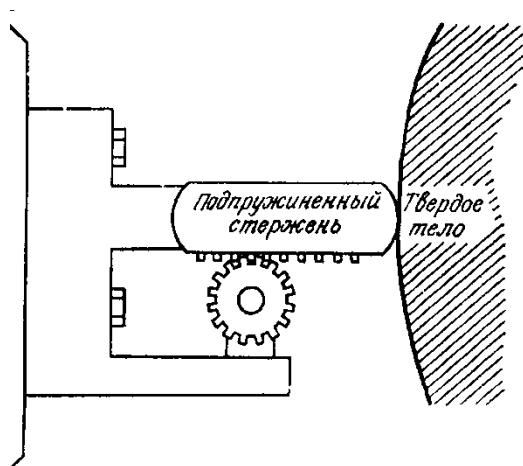


Рис. 2.43. Типичный аналоговый тактильный датчик

Горизонтальная сила, действующая на стержень, преобразуется в пропорциональный поворот оси. Этот поворот непрерывно измеряется с помощью потенциометра или кодовым устройством с дискретным выходом. При известной жесткости пружины сила соответствует указанному перемещению.

Для увеличения объема информации о процессе взаимодействия робота с объектом на схвате робота размещают матрицы тактильных датчиков, параметры которых меняются в зависимости от давления («графитовые столбики») (рис. 2.44).

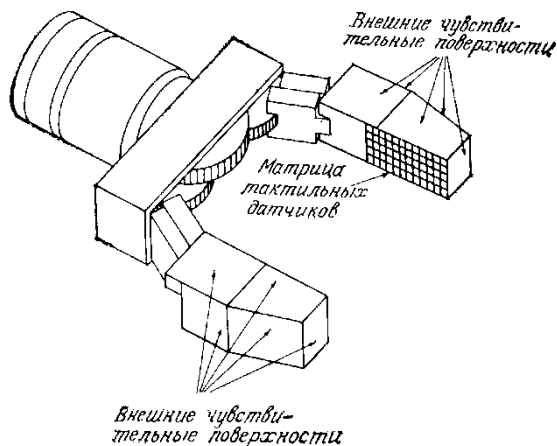


Рис. 2.44. Схват робота, оснащенный матрицами тактильных датчиков

В таких устройствах, обычно называемых «искусственной кожей», давление от объекта вызывает соответствующие деформации, которые измеряются как непрерывно меняющееся сопротивление. Изменение сопротивления легко преобразуется в электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна силе, действующей на соответствующую точку поверхности матрицы.

Использование чувствительного элемента непосредственно в качестве рабочей поверхности (например, для измерения локальных усилий) в принципе возможно для некоторых типов преобразователей (магнитоупругие, кристаллические полупроводниковые, проводящая резина и др.). Однако механические свойства материалов всех этих чувствительных элементов (кроме магнитоупругих) допускают такое использование только в самых благоприятных случаях – для работ с малыми нагрузками. Магнитоупругие преобразователи могут быть использованы только для измерения значительных усилий (не менее 10^8 Па), поэтому использование их в качестве тактильных датчиков не рассматривается.

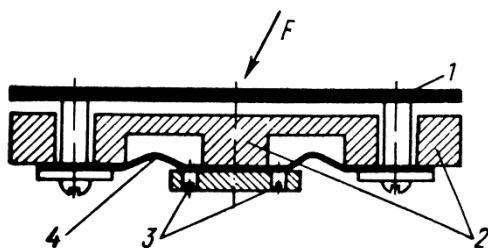


Рис. 2.45. Тактильный датчик

Часто оказывается, что площадь приложения внешнего усилия меньше площади рабочей поверхности отдельного датчика. В этих случаях измеренная величина не должна зависеть от точки приложения усилия. Это определяет требования к конструкции датчика. Одна из возможных конструкций тактильного датчика с жесткой рабочей поверхностью представляет собой металлическую пластину 1, свободно подвешенную на плоских пружинах 4 (рис. 2.45). Отсутствие трения в направляющих (для малых усилий) и возможность плавной регулировки 3 натяжения пружины позволяют измерять малые усилия (прикосновения).

В то же время благодаря упорам 2 датчик может выдерживать значительные перегрузки, в том числе и направленные вдоль рабочей поверхности. Чувствительные элементы (на рис. 2.45 не показаны) располагаются в нескольких точках (четыре и более) по периметру рабочей поверхности. Благодаря этому суммарный сигнал практически не зависит от места приложения усилия.

Рассмотрим некоторые типы преобразователей и возможность их использования для создания тактильных датчиков. Простейшим датчиком является контактный, т.е. датчик, в котором механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов. Контакты являются наиболее ответственной частью датчика. Материал, конструкция, режим их работы определяют как надежность, так и стабильность работы датчика во времени. Выбор материала контактов определяется прежде всего контактным усилием, значение которого колеблется в широких пределах: 0,001–0,02 Н (для высокочувствительных маломощных контактных преобразова-

телей). Для большинства обычных материалов контактов оптимальное усилие составляет 0,03 Н. Следует обращать особое внимание на износоустойчивость контактов. Наиболее стойкими по отношению к коррозии являются контакты из золота и платины, которые могут применяться при малых контактных усилиях (0,01–0,02 Н), но их твердость и соответственно износоустойчивость невелики. Наиболее распространенным материалом для маломощных контактов является серебро. Под действием электрической искры серебряные контакты покрываются оксидной пленкой, которая электропроводна и легко разрушается при усилиях 0,05–1 Н.

Контактные датчики могут использоваться в качестве тактильных в нормальных атмосферных условиях. Их недостатки: невозможность использования в химически активной среде и под водой, необходимость периодической проверки, работоспособности контактов и их чистки.

Датчики с магнитоуправляемыми контактами свободны от перечисленных недостатков. Магнитоуправляемый контакт представляет собой стеклянную капсулу, внутри которой содержится нейтральный газ или вакуум. В капсулу впаяны пластинки из ферромагнитного материала, контактные поверхности которых имеют специальное покрытие, уменьшающее их износ. При действии на капсулу внешнего магнитного поля контакты замыкаются. Магнитоуправляемые контакты обладают большим быстродействием (время срабатывания 3 мс, отпускания – 0,8 мс), допускают большое число включений (до 10^8), работают в широком диапазоне температур окружающей среды и обладают вибро- и ударостойкостью. Недостатком датчика является необходимость обеспечения сильного внешнего магнитного поля.

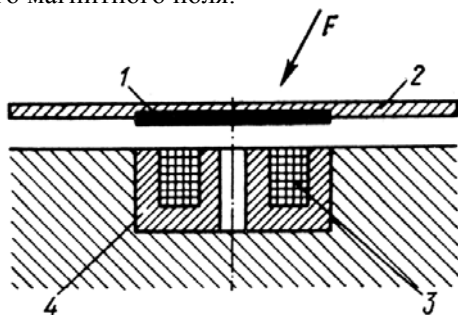


Рис. 2.46. Магнитоуправляемый контактный датчик:

- 1 – рабочая поверхность;
- 2 – магнит; 3 – магнитоуправляемый контакт; 4 – катушка

В качестве тактильных датчиков можно использовать и индуктивные датчики (рис. 2.46), основанные на зависимости индуктивности системы от магнитного сопротивления зазора в магнитопроводе.

Индуктивные датчики отличаются надежностью в работе, высокой чувствительностью и малыми габаритами.

В заключение рассмотрим тактильный датчик с использованием поверхностных ультразвуковых волн. Поверхностные волны представляют собой наложение волн, продольных и поперечных по отношению к направлению распространения колебаний. Для такого наложения используются преобразователи в виде клина (рис. 2.47). Угол клина подбирается таким, чтобы, выходя из клина, волна распространялась вдоль поверхности. Клин образует начало дорожки поверхностных волн, которая распространяется в виде прямоугольной полоски до тех пор, пока не встретит противоположный край пластины, где располагается приемник. При наличии препятствий ультразвуковая волна меняет свою форму (фазу и амплитуду колебаний), появляются гармонические составляющие. Приемник улавливает эти изменения и выдает сигнал о наличии препятствия. Обычно поверхностные волны получают в коротковолновом диапазоне ультразвуковых колебаний на частотах 1–10 МГц. Поверхностные ультразвуковые волны способны огибать кривые поверхности, если только не нарушается непрерывность или кривизна поверхности не меняется слишком круто. В последнее время в практике протезирования начинают применять датчики измерения механических усилий, которые используют проводящую резину, изменяющую электрическое сопротивление при деформации; по-видимому, применение таких датчиков имеет перспективу и для роботов.

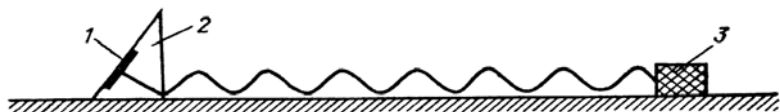


Рис. 2.47. Схема образования поверхностных ультразвуковых волн: 1 – излучатель; 2 – призма; 3 – приемник

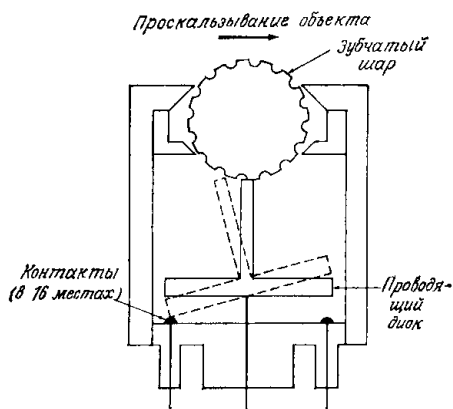


Рис. 2.48. Устройство для определения величины и направления проскальзывания

Рассмотренные тактильные датчики измеряют силы, перпендикулярные к чувствительной поверхности датчика. Определение проскальзывания путем измерения тангенциального движения является другой важной задачей тактильного осязания. Датчик для определения проскальзывания включает свободно вращающийся зубчатый шар, который отклоняет тонкий стержень, установленный на оси проводящего диска (рис. 2.48). Под диском равномерно расположены электрические контакты. Вращение шара, вызванное проскальзыванием по нему объекта, приводит к вибрации стержня и диска с частотой, пропорциональной скорости вращения шара. От направления вращения зависит, какой контакт будет задействован вибрирующим диском. Усредненное направление проскальзывания определяется по импульсам в соответствующих выходных электрических контурах.

Силомоментное осязание. Силомоментные датчики используются в основном для определения сил реакции, возникающих при механической сборке. Основные методы в этой области направлены на осязание сочленений и схвата робота.

Датчик сочленения измеряет в декартовых координатах силы и моменты, которые действуют на робот, и производит их векторное сложение. Для сочленения, перемещаемого с помощью двигателя постоянного тока, осязание производится простым измерением тока якоря.

Датчики схвата размещаются между конечным звеном манипулятора и схватом. Они состоят из измерителей напряжений, которые определяют отклонение механической системы под действием внешних сил.

2.8.9. Элементы датчика схвата, встроенного в запястье

Датчики представляют собой небольшие, чувствительные, легкие (~370 г) и относительно компактные конструкции диаметром 10 см и толщиной 3 см с динамическим диапазоном до 90 кг. Для уменьшения гистерезиса и увеличения точности измерения датчик обычно выполняют из одной твердой металлической заготовки (как правило, алюминиевой).

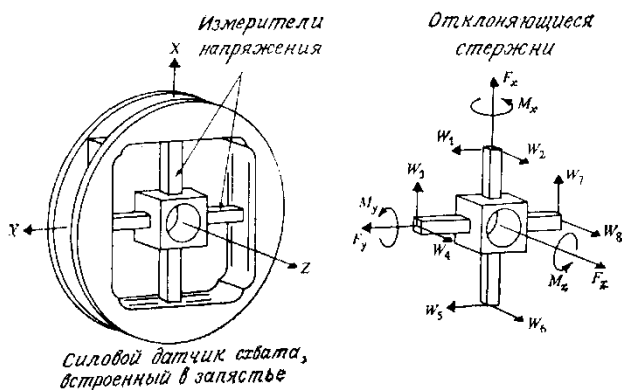


Рис. 2.49. Силовой датчик схвата, встроенный в запястье

Например, датчик, показанный на рис. 2.49, содержит восемь пар полупроводниковых измерителей механических напряжений, установленных на четырех отклоняющихся стержнях – по одному измерителю на каждой стороне стержня. Дифференциальное включение измерителей обеспечивает автоматическую компенсацию изменений температуры. Это первичная грубая компенсация. Так как восемь пар измерителей напряжения расположены нормально к осям x , y и z системы координат сил, три компоненты силы \mathbf{F} и три ком-

поненты момента M могут быть определены соответствующим сложением или вычитанием выходных напряжений (токовая компенсация). Важно, чтобы движения в схвате, производимые силовыми датчиками, не влияли на точность позиционирования манипулятора.

Требования к датчикам:

1. **Высокая жесткость.** Частота собственных колебаний механического устройства связана с его жесткостью, следовательно, высокая жесткость обеспечивает быстрое демпфирование возникающих колебаний при измерении сил и точность показаний на коротких временных интервалах. Это снижает величину отклонений от действия сил и моментов, которая может привести к ошибке позиционирования манипулятора.

2. **Компактность конструкции.** Это позволяет облегчить движение манипулятора в условиях навала деталей, а также уменьшить вероятность столкновения датчика с объектами, находящимися в рабочем пространстве. Компактный датчик можно размещать ближе к расположенному в схвате технологическому оборудованию, благодаря чему уменьшается ошибка позиционирования оборудования из-за неадекватности рабочих условий оборудования и датчика. Желательно расширить диапазон измерения сил и моментов. Этому способствует минимизация расстояния между манипулятором и датчиком, приводящая к уменьшению величины рычага прикладываемых к манипулятору сил.

3. **Линейность.** Хорошая линейность выхода чувствительных элементов от прикладываемых сил и моментов позволяет выделить силы и моменты с помощью простых матричных операций. Упрощается процесс калибровки датчика силы.

4. **Малые величины гистерезиса и внутреннего трения.** Внутреннее трение уменьшает чувствительность измерительных элементов. Это также уменьшает гистерезисные эффекты при возвращении измерительного прибора в исходное положение.

2.8.10. Внутренние датчики информации о состоянии рабочих органов робота

Основными параметрами движения робота-манипулятора являются линейные и угловые перемещения звеньев рук и ног робота в

пространстве. Соответствующие скорости и ускорение звеньев легко определяются путем последовательного дифференцирования.

Рассмотрим датчики угловых и линейных перемещений, которые могут быть использованы в информационных системах роботов.

Для измерения угловых перемещений чаще всего применяются потенциометрические датчики, преобразующие угол поворота в напряжение. Точность прецизионных потенциометров может достигать 0,01–0,05 %, разрешающая способность – 0,05–0,01 %. С повышением разрешающей способности потенциометра, как правило, увеличиваются его габариты, которые для большинства прецизионных потенциометров колеблются в следующих пределах: диаметр 60–150 мм, высота 50–90 мм. Малые габариты и очень высокую разрешающую способность имеют многооборотные спиральные потенциометры.

Основные недостатки потенциометрических датчиков заключаются в износе проволоки и щетки, ограниченной разрешающей способности и низкой чувствительности по напряжению. От этих недостатков свободны трансформаторные преобразователи угловых перемещений. Наибольшее распространение имеют вращающиеся трансформаторы и сельсины, позволяющие получать напряжения переменного тока, пропорциональные тригонометрическим функциям угла поворота или самому углу. Следует отметить, что однозначная зависимость выходного напряжения у них в функции угла поворота ограничена интервалом $0-\pi$. Недостатком трансформаторных преобразователей является сравнительно низкая точность воспроизведения функции угла поворота, не превышающая в большинстве случаев 0,1–0,2 %.

Для измерения линейных перемещений можно использовать как потенциометрические, так и индуктивные датчики. Использование индуктивных датчиков для непосредственного измерения перемещения возможно только при движении подвижного звена в пределах 80–100 мм. Для повышения точности измерения обычно применяют датчики дифференциального типа с двумя катушками. Основным недостатком этих датчиков заключается в нелинейности их характеристик, что и затрудняет их использование для измерения значительных перемещений.

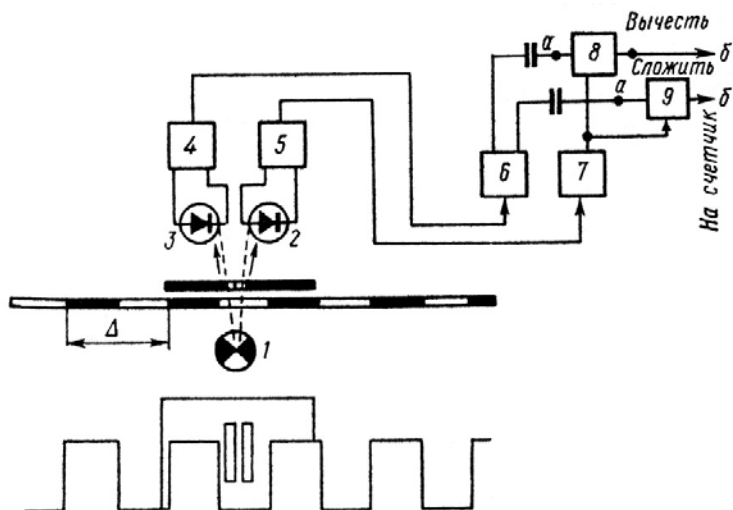


Рис. 2.50. Блок-схема фотометрического счетного датчика:
 1 – источник света; 2–3 – фотодиоды; 4–5 – усилители; 6–7 – триггеры;
 8–9 – ключи

И, наконец, для измерения линейных и угловых перемещений можно использовать счетные датчики, т.е. датчики, у которых выходная величина представляется числом импульсов. В тех случаях, когда требуется различать направление изменения измеряемой величины, применяют двухфазную систему воспринимающих элементов. Рассмотрим схему (рис. 2.50) фотоэлектрического преобразователя с зубчатым диском и двумя фотодиодами, сдвинутыми относительно друг друга на четверть зубцового деления. При вращении диска вправо выходной сигнал левого фотодиода опережает выходной сигнал правого; при вращении влево – наоборот. Это дает возможность, используя логические цепи, различать импульсы, соответствующие увеличению и уменьшению угла поворота. Счетчик импульсов при этом должен быть реверсивным, т.е. должен допускать сложение или вычитание каждого последующего импульса.

Работу простейшей логической цепи иллюстрируют кривые на рис. 2.51. Счетный датчик особенно удобен для использования с

цифровой ЭВМ, так как в этом случае отпадает необходимость в аналого-кодовом преобразователе.

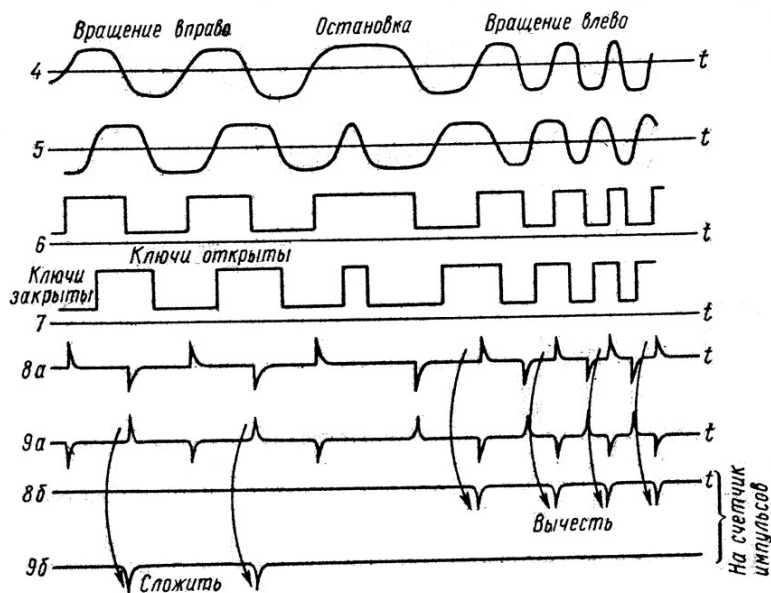


Рис. 2.51. Временная диаграмма работы фотометрического счетного датчика: 4–9 – сигналы на выходе; 8а, 9а – сигналы на входе соответствующих блоков

Наряду с измерением угловых и линейных перемещений часто необходимо иметь информацию о различного рода деформациях и механических напряжениях. Для измерения относительных деформаций в пределах 0,005–1,5 % обычно используются проволочные тензометры на бумажной основе, а также фольговые и пленочные тензосопротивления. Тензосопротивления практически безынерционны и могут применяться в диапазоне частот от 0 до 100 кГц. Рядом преимуществ перед подобными тензосопротивлениями обладают полупроводниковые тензодатчики: очень малые размеры (до 1 мм), высокая тензочувствительность (на 2 порядка выше, чем у проволочных тензометров), высокий уровень выходного сигнала.

Полупроводниковые тензосопротивления могут иметь как положительный, так и отрицательный коэффициент тензочувствительности, т.е. при деформации их сопротивление может и увеличиваться, и уменьшаться. К их недостаткам следует отнести изменение коэффициента тензочувствительности в зависимости от уровня деформации, температуры, удельного сопротивления материала.

2.8.11. Пример применения датчиков информации в роботах

Мы рассмотрели практически все типы датчиков, которыми необходимо снабдить робот в наиболее общем случае. Естественно, что при разработке роботов-манипуляторов, предназначенных для решения некоторого специального класса задач, следует особое внимание обратить на рациональный выбор сенсорных (чувствительных) устройств, входящих в информационную систему роботов.

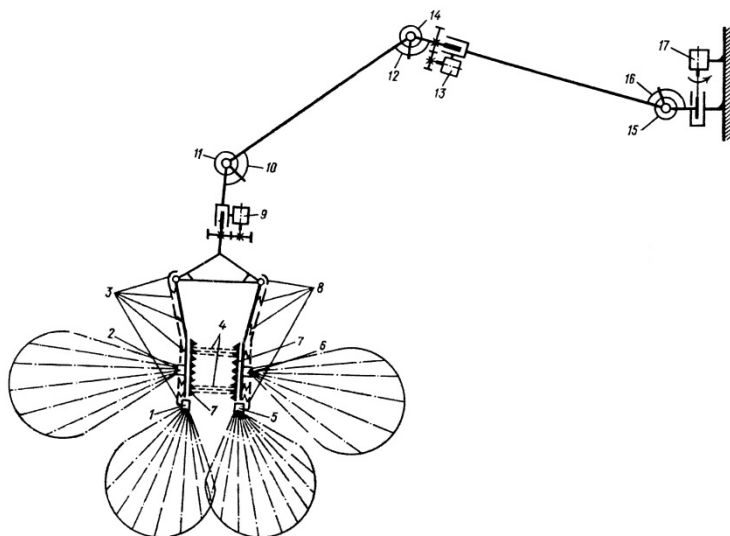


Рис. 2.52. Размещение датчиков на руке манипулятора

Рассмотрим один из возможных простейших вариантов размещения датчиков на рабочем органе манипулятора (рис. 2.52). В «суставах» рабочего органа располагаются датчики положения потенциометрического типа 9, 10, 12, 13, 16, 17, определяющие угловые положения звеньев, и датчики усилий 11, 14, 15, измеряющие полезные усилия в приводах звеньев. На внешней и внутренней поверхностях схвата располагаются тактильные датчики 3, 8, регистрирующие соприкосновение объектов внешней среды с определенной частью поверхности схвата. Датчики ближнего обнаружения 1, 2, 5, 6 регистрируют объекты, расположенные вблизи боковых поверхностей схвата; фотометрические датчики 4, регистрирующие наличие объекта внутри схвата, и датчики 7, измеряющие силу сжатия схвата, расположены на внутренней поверхности схвата.

На рис. 2.53 показана конструкция схвата с расположенными на нем датчиками. Тактильные датчики 4, 9, 13, 14 – контактного типа с жесткой рабочей поверхностью и порогом срабатывания 10–15 г. Датчики 1, 3, 5, 7, 8, 11 контактного типа выполнены в виде «дверцы» с неподвижной осью. Порог чувствительности их около 30 г в средней части контактируемой поверхности и зависит от места приложения усилия. Датчики 2, 10, 15 фотометрического типа работают по принципу прерывания луча. Фотометрический датчик ближнего обнаружения 6 производит измерение отраженного светового потока. Потенциометрический силометрический датчик 12, расположенный на тяге привода пальцев схвата, выдает сигнал, пропорциональный усилию сжатия пальцев.

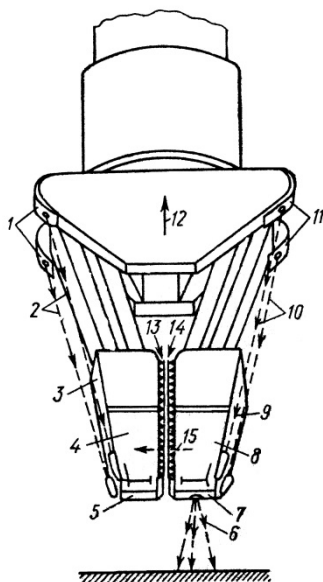


Рис. 2.53. Внешний вид схвата оснащенного датчика

Робот-манипулятор может быть как неподвижным, так и подвижным, причем передвигаться он может как при помощи колес, так и при помощи «ног».

К датчикам состояния шагающего устройства (число ног у шагающего устройства не менее двух) относятся: датчики положения звеньев, измеряющие угловые координаты органов перемещения; датчики усилий в приводах; датчики горизонта, измеряющие угловые отклонения координат, связанных с платформой шагающего устройства, от координат, связанных с горизонтом (гировертикаль). К датчикам состояния внешней среды относятся: тактильные датчики, фиксирующие соприкосновение «стопы» органа перемещения с поверхностью; локационные датчики, измеряющие высоту платформы над поверхностью; локационные датчики, измеряющие высоту опорной части ноги над поверхностью.

Итак, мы видим, что робот – это сложная система, снабженная большим количеством различного рода информационных устройств. Для того чтобы целесообразно использовать информацию, получаемую от датчиков, необходимо организовать систему обработки чувствительной информации. Структура этой системы (как и структура всего робота) построена по иерархическому принципу, причем чем выше уровень обработки информации, тем меньше ее избыточность и тем более обобщенные характеристики передаются на следующие уровни. Следует иметь в виду, что обработанная информация поступает на разные уровни системы управления роботом, например, информация о положении звеньев манипулятора обрабатывается системой, обладающей всего одним уровнем обработки, на выходе которого имеются сигналы, пропорциональные величинам углов между звеньями манипулятора. Эта информация поступает в низшие уровни системы управления манипуляторов, поскольку она необходима прежде всего для управления движениями руки (как сигналы обратной связи о положении звеньев).

Тесты к главе 2

1. Какой тип освещения используется для работы с объектами, имеющими зафиксированные поверхности?

- а) Заднее освещение объекта коллимированным источником.
- б) Диффузионное переднее освещение.

- в) Пространственно модулированный источник света.
- г) Направленный свет для изучения неровных поверхностей.

2. Определение взаимосвязи источника и приемника оптического излучения – это:

- а) Оптические проблемы.
- б) Функциональные проблемы.
- в) Проблемы взаимодействия с внешней средой.

3. Один из минусов цифровых мозаичных преобразователей с однородными вычислительными средами:

- а) Низкий коэффициент заполнения площади мозаики фоточувствительными площадками приемников излучения.
- б) Низкая скорость выполнения процедур обработки изображений.
- в) Большое число узлов на одной твердотельной мозаике.

4. Передающие телевизионные трубки с накоплением заряда, действие которого основано на внешнем фотоэффекте, называются:

- а) Диссекторы.
- б) Видиконы.
- в) Суперортиконы.

5. К цифровым характеристикам ПТТ не относятся:

- а) Разрешающая способность.
- б) Геометрические искажения.
- в) Передаточная функция.

6. К основным узлам ТПК не относятся:

- а) Устройства формирования сигналов развертки.
- б) Устройства усиления видеосигнала.
- в) Устройства преобразования видеосигнала.
- г) Устройства обработки видеосигнала.

7. Принцип запоминающих устройств со словарной выборкой – это:

- а) Запись и считывание информации осуществляется параллельно-последовательным способом, по строкам матрицы с заданным адресом – номером строки.

- б) Возможны запись и считывание видеоинформации с произвольного элемента матрицы при задании его адреса.

в) Видеоинформация вводится поэлементно последовательно во времени и также считывается.

8. Возможно ли производить операции между изображениями, такие как сложение, вычитание, сравнение, при использовании видеопроцессора с матричной структурой?

- а) Нет.
- б) Да.
- в) Только при мультипроцессорной структуре.

9. Какого цвета станет центральный фрагмент бинарного изображения 3×3 , если как минимум четыре соседних элемента «черного» являются также «черными» при матричной структуре процессора?

- а) Серого.
- б) Белого.
- в) Черного.

10. Как упорядочены процессорные элементы в конвейерных видеопроцессорах?

- а) Содержат несколько «слоев» процессорных матриц.
- б) Составляют последовательный ряд.
- в) Содержат регулярную сеть процессорных элементов, каждый из которых работает циклически, чередуя прием и передачу видеоинформации.

11. Какой тип видеопроцессоров позволяет реализовывать необходимое быстродействие путем объединения ряда универсальных микропроцессоров общей шиной, кольцевой шиной или коммутируемой сетью?

- а) Видеопроцессоры с мультимикропроцессорной структурой.
- б) Видеопроцессоры с параллельной структурой.
- в) Видеопроцессоры со систолической структурой.

12. Принцип действия индуктивных датчиков:

- а) Когда датчик приближается к ферромагнитному материалу, изменяется расположение силовых линий постоянного магнита.
- б) Основан на эффекте Холла.
- в) Основан на изменении емкости, которая зависит от расстояния до поверхности объекта в зоне действия чувствительного элемента.

13. В каком режиме обычно работают емкостные датчики?
- В аналоговом.
 - В трехпозиционном.
 - В дискретном пороговом.
14. От чего зависят характеристики датчиков измерения в ближней зоне?
- От материала объектов измерения.
 - От внешних магнитных полей.
 - От внешних электрических полей.
15. Пьезоэлементы используются для:
- Измерения расстояния.
 - Измерения усилий.
 - В оптических датчиках.
16. Какой тип тактильного датчика выдает выходной сигнал, пропорциональный прикладываемой силе?
- Дискретный.
 - Аналоговый.
 - Оптический.
17. Основной недостаток индуктивных датчиков, затрудняющий их использование для измерения значительных перемещений:
- Стоимость.
 - Дискретность.
 - Нелинейность характеристик.

Контрольные вопросы к главе 2

- Представьте типовые схемы базовых осветительных систем, схемы размещения осветителей в рабочей зоне мехатронной системы.
- Обоснуйте применение основного энергетического уравнения при формировании нужного освещения в рабочей зоне.
- Поясните принципы действия и основные технические характеристики твердотельных приемников излучения.
- Представьте основные схемы МЭПИ.
- Изложите основные режимы работы фотодиодной МЭПИ и МЭПИ на ПЗС-структуре.
- Назовите основные способы первичного кодирования изображения.

7. Назовите основные виды обработки видеoinформации.
8. Представьте структуру матричного (клеточного) видеопроцессора.
9. Поясните принципы действия видеопроцессора пирамидального типа и видеопроцессора конвейерного типа.
10. Назовите известные вам датчики оцувствления роботов в ближней и сверхближней зонах.
11. Чем отличаются видеопроцессоры с параллельной и мультипроцессорной структурами от видеопроцессора со систолической структурой.
12. Представьте схемы индуктивного датчика.
13. Изложите принципы действия датчика Холла, емкостного датчика и порогового датчика.
14. Как функционирует ультразвуковой датчик?

Список литературы к главе 2

1. Системы технического зрения: справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др.; под общ. ред. В.И. Сырякина, В.С. Титова. Томск, 1992. 367 с.
2. *Мошкин В.И. и др.* Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
3. *Кулешов В.И. и др.* Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
4. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем : учеб. пособие. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.

Глава 3. СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

3.1. Системы технического зрения роботов как разновидность информационных систем мехатроники

3.1.1. Общие сведения о системах технического зрения (СТЗ)

Под техническим зрением в робототехнике понимают процесс восприятия роботом окружающих объектов с помощью датчиков оптической информации, оценки местоположения объектов и их распознавания на основе полученной видеoinформации. Системы технического зрения (СТЗ) состоят из датчиков оптической информации (ДОИ) и средств обработки и анализа изображения и других устройств. Средства обработки и анализа изображения реализуются на микроЭВМ или микропроцессорах. Разработке СТЗ придается большое значение во всех развитых странах мира. Бурно растет рынок СТЗ.

Система технического зрения в общем случае должна обеспечивать: 1) восприятие (регистрацию) первичной информации – исходного изображения; 2) формирование модели ситуации на основе первичной зрительной информации для последующей обработки (аналоговая картинная модель, цифровая модель и т.п.); 3) поиск объектов; 4) классификацию объектов; 5) определение местонахождения объектов в рабочей зоне; 6) определение ориентации объектов в пространстве или на плоскости; 7) измерение характерных параметров объекта или совокупности объектов (числа объектов, геометрических размеров, площади, цвета и т.п.).

Обобщенная структурная схема технического зрения робота (рис. 3.1) содержит основную цепь регистрации изображения, обработки и формирования управляющих сигналов. Основная цепь СТЗ связана с датчиками изображения ($ДИ_1$). Вспомогательная цепь 2 связана с дополнительным датчиком изображения $ДИ_д$, конструктивно совмещенным с манипулятором робота. Цепь 1 может быть использована для поиска объекта манипулирования (ОМ) и его опознавания, наведения охвата робота на объект. Точное наведение (корректировка положения манипулятора) осуществляется с помощью вспомогательной цепи с датчиком $ДИ_д$. Третья, четвертая и

пятая цепи управления предназначены для настройки СТЗ, на выполнение определенной задачи путем изменения алгоритма обработки изображения, положения датчиков ДИ₁–ДИ_д (изменения фокусировки, диафрагмы), положения и режима работы осветителя (ОС). Шестая цепь управления предназначена для управления формирователем рабочей зоны (например, механизмом смещения или конвейером), осуществляющим подачу ОМ в рабочую зону.

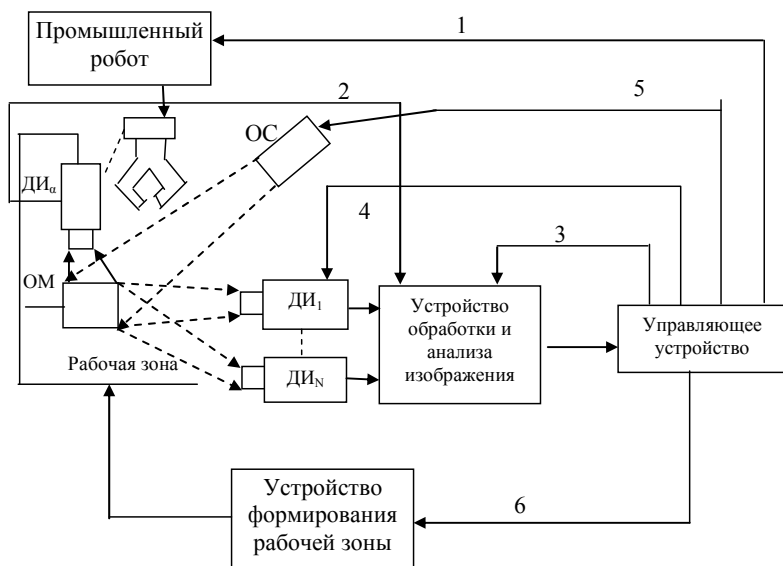


Рис. 3.1. Структурная схема технического зрения промышленного робота

На практике в схемах СТЗ могут отсутствовать те или иные цепи обратной связи, иметь различный тип и степень развития других устройств, но всегда имеется основная или вспомогательная цепь управления с датчиком изображения [1].

3.1.2. Классификация СТЗ

При классификации СТЗ среди многочисленных оснований (признаков) их деления выберем десять [1]: 1) принцип действия,

2) функциональное назначение 3) автономность, 4) дальность действия, 5) метод получения информации, 6) количество видеодатчиков (глаз), 7) вид рабочей информации, 8) способ размещения, 9) метод обработки сигнала, 10) анализ цвета. В соответствии с принципами действия системы технического зрения подразделяются на СТЗ на основе двухпозиционных (логических) систем, координаторы, обзорно-сравнительные системы (ОСС) и биоструктуры (рис. 3.2).

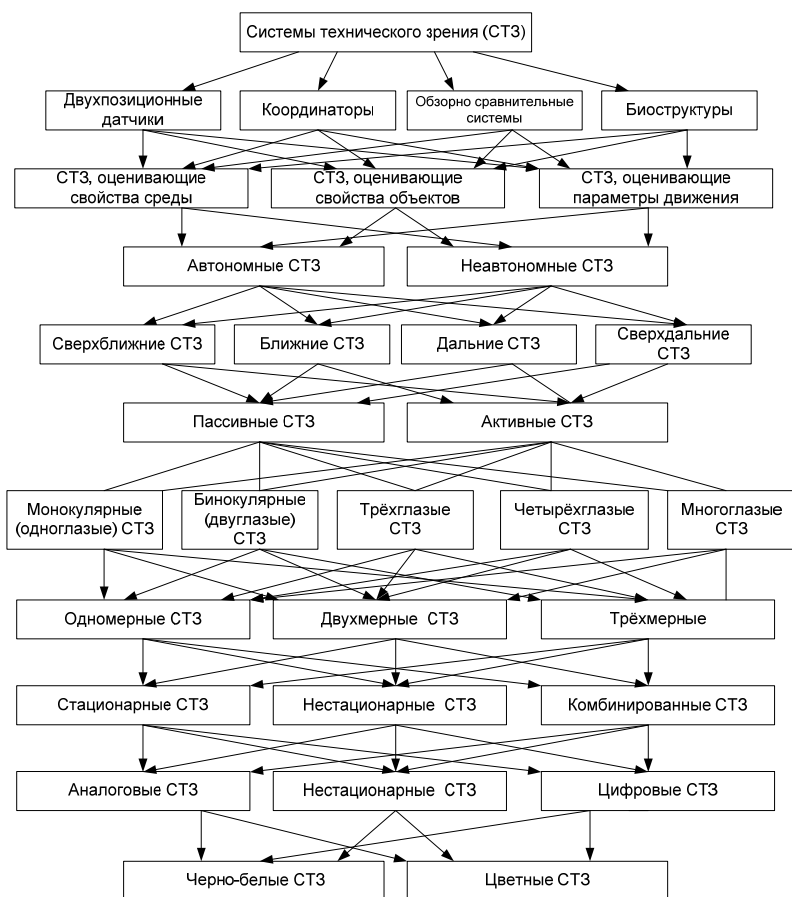


Рис. 3.2. Классификация СТЗ

Двухпозиционные СТЗ, построенные на логическом принципе решения «да-нет», в свою очередь, делятся на оптоэлектронные и светолокационные. К оптоэлектронным СТЗ относятся волоконно-оптические системы, в которых информативным признаком является показатель преломления света. Светолокационные системы строятся на принципе излучатель–фотоприемник, источник света–фотодиод, лазер–фотоприемник, светоизлучатель–телекамера.

Координаторы как класс СТЗ с помощью датчиков изображения и устройств обработки и анализа изображения регистрируют положение ОМ в рабочей зоне робота и на основе полученной видеoinформации определяют координаты ОМ. По типу используемого датчика изображения координаторы делятся на СТЗ, используемые информационные линейки и поля (ИЛП) и телевизионные системы (ТС). Оновным блоком является телекамера, осуществляющая считывание изображения и предварительную его обработку.

Обзорно-сравнительные системы извлекают необходимую информацию путем обзора пространства и сравнения полученных сигналов (изображений) с эталонными и делятся на ТС, светолокационные и корреляционные системы технического зрения (КСТЗ).

Биоструктуры, базирующиеся на принципе работы зрительных систем живых организмов, подразделяются на детекторы контуров и детекторы движения.

По функциональному назначению СТЗ разделяются на системы, выявляющие свойства а) внешней среды (осмотр пространства, определение наличия объектов, их взаимосвязь), б) определенных объектов (распознавание цвета и формы, определение координат центра формы, угла ориентации и расстояния до объекта) и в) системы, определяющие параметры движения в среде.

Следующим основанием классификации, учитывающим особенности применения СТЗ, является автономность. Автономные СТЗ по сравнению с неавтономными не требуют наличия внешних устройств для получения или переработки информации. К ним относятся ТС, оптоэлектронные и светолокационные СТЗ, обрабатывающие информацию аналоговыми устройствами или микроЭВМ (микропроцессорами). Для функционирования неавтономных СТЗ необходимы либо светомаяки, реперы, специальные метки, нанесенные на предмет (сетка с чередующимися белыми и черными квадратами, насечки, соответствующие определенному коду), либо центральные

ЭВМ, предназначенные для обработки информации о производственной сцене.

В зависимости от дальности действия различают сверхближние, ближние, дальние и сверхдальние СТЗ. СТЗ сверхближнего действия (СТЗСБД) используются в качестве измерителей расстояния и анализаторов физико-химических характеристик объекта. Конструктивно СТЗСБД могут выполняться комбинацией оптических и тактильных сенсоров. СТЗ ближнего действия (СТЗБД) предназначены для анализа информации в локальной зоне промышленного робота (ПР) – подсчета числа объектов, определения расстояния до объектов и скорости их перемещения и т.п. СТЗ строятся на основе ТС, ИЛП и светолокационных систем. СТЗ дальнего действия (СТЗДД) обеспечивают восприятие и анализ информации в пределах рабочей зоны ПР и создаются на базе ТС, ИЛП и светолокационных систем. СТЗ сверхдальнего действия (СТЗСДД) воспринимают информацию вне рабочей зоны ПР и обеспечивают контроль состояния свободного пространства вне этой зоны.

По методу получения информации СТЗ делят на пассивные и активные, каждая из которых может быть с фиксированным направлением восприятия (ФНВ) или с переменным направлением восприятия (ПНВ). Пассивные СТЗ функционируют без облучения, а активные СТЗ – с облучением поля зрения. Системы с ПНВ в отличие от систем с ФНВ осуществляют сканирование либо датчиком изображения, либо считывающим лучом. К пассивным СТЗ с ФНВ относятся ТС, ИЛП и оптоэлектронные системы. Примером пассивных СТЗ с ПНВ могут служить системы, в которых датчики изображения (ДИ) производят такие движения, как сканирование вокруг предмета, качание и поисковые движения совместно со схватом манипулятора. Активные СТЗ с ФНВ строятся (как и активные СТЗ с ПНВ) на принципе работы светолокационных систем. В активных СТЗ с ПНВ направление восприятия изменяется по командам от блока управления ЭВМ.

Количество датчиков изображения (глаз) СТЗ определяется сложностью решаемой задачи. По числу ДИ СТЗ подразделяются на монокулярные (одноглазые), бинокулярные (двуглазые), бинокулярные с дополнительным третьим видеодатчиком (трехглазые), бинокулярные с дополнительным третьим и четвертым ДИ (четыреглазые) и многоглазые. Простейшим типом СТЗ являются одноглазые системы. Одна-

ко с их помощью можно решать довольно сложные задачи: распознавание формы, определение координат и ориентации объекта манипулирования, контроль поверхности объекта и др. [1–4]. Двух-, трех-, четырех- и многоглазые системы позволяют воспринимать и обрабатывать трехмерную информацию.

С количеством ДИ связано и седьмое основание классификации – вид рабочей информации. По этому признаку различают одномерные, двумерные и трехмерные СТЗ. К одномерным относятся системы, снимающие информацию в точке, в совокупности точек или линий. Двумерные системы анализируют информацию, снимаемую с плоских изображений. Трехмерные СТЗ обеспечивают восприятие и анализ объемных изображений. Последние способны восстанавливать трехмерные изображения по их проекциям.

По способу размещения СТЗ (или их ДИ) на робототехническом комплексе СТЗ делятся на стационарные, нестационарные и комбинированные. Стационарные СТЗ устанавливаются жестко над конвейером, перед ним или возле него. Нестационарные СТЗ располагаются на подвижных элементах конструкций робота, например: в охвате, на манипуляторе, на специальных механизмах качания СТЗ или вращения СТЗ. Комбинированные СТЗ представляют собой комбинацию стационарных и нестационарных СТЗ. Такие системы имеют не менее двух глаз.

В зависимости от метода обработки сигналов СТЗ разделяются на аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и аналого-цифровые (комбинированные). В аналоговых СТЗ все вычисления производятся в аналоговой форме, а в цифровых – в цифровой форме на ЭВМ или спецпроцессорах. В аналого-цифровых СТЗ часть операций осуществляется в аналоговой, а другая часть в цифровой форме.

В зависимости от возможностей анализа цвета предмета СТЗ делятся на черно-белые и цветные. Наиболее широко применяются черно-белые СТЗ, в которых анализируются черно-белые изображения. Цветные СТЗ различают спектр излучения от фиолетового до темно-красного цвета. Распознавание цвета в таких системах осуществляется с помощью светофильтров красно-зеленого цвета, установленных на вращающемся диске перед датчиком изображения.

3.1.3. Обобщенная структурная схема СТЗ

Укрупненная обобщенная схема СТЗ дана на рис. 3.3 [1, 2]. Она будет заметно изменяться в зависимости от конкретного приложения и технической реализации СТЗ. Поскольку наибольшее применение получили СТЗ цифрового типа, то представляет интерес рассмотрение обобщенной структурной схемы СТЗ с использованием микроЭВМ или микропроцессоров.

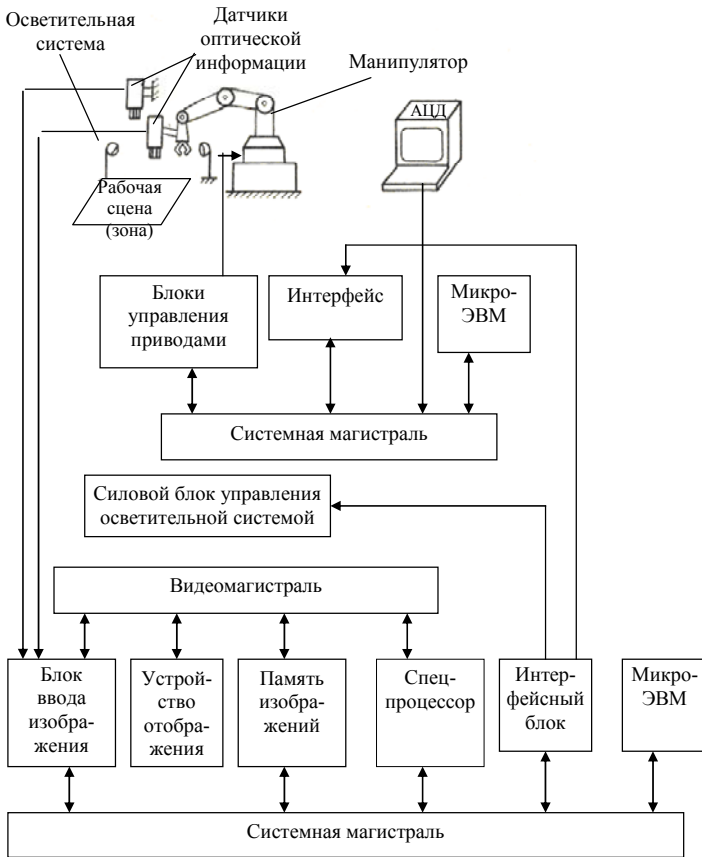


Рис. 3.3. Структура системы технического зрения и системы управления промышленным роботом

Структурная схема такой СТЗ совместно с системой управления адаптивным промышленным роботом приведена на рис. 3.3. В представленном варианте система технического зрения является функционально автономной, так как, помимо спецпроцессора, предназначенного для обработки изображений, в ее состав входит микроЭВМ, осуществляющая управление последовательностью выполнения процедур обработки изображений, обмен информацией с системой планирования и управления движением робота, а также обеспечивающая реализацию различных алгоритмов адаптации системы технического зрения к изменяющимся условиям внешней среды.

Важным блоком представленной СТЗ является блок ввода изображения, в состав которого входит программно-управляемый коммутатор, обеспечивающий подключение требуемого датчика оптической информации, аналого-цифровой преобразователь и буферное запоминающее устройство.

Для хранения эталонных и исследуемых изображений используется память изображений, а для визуализации изображений в любой момент их обработки – устройство отображения. Все блоки СТЗ, непосредственно участвующие в обработке изображений, подключены к общей видеомагистральной линии. Управление порядком функционирования СТЗ осуществляется через системную магистраль, к которой подключены все блоки системы.

Управление силовым блоком осветительной системы, осуществляемое с целью компенсации изменений внешней освещенности, производится программно на основе анализа изображений поступающей от датчиков оптической информации (ДОИ). Число ДОИ определяется особенностями решаемой задачи промышленным роботом.

3.1.4. Требования, предъявляемые к СТЗ

Техническое задание на разработку СТЗ робота должно содержать ряд специфических требований: 1) к уровню «интеллекта», т.е. способности решать различного уровня сложности функциональные задачи; 2) форме и размерам рабочей зоны; 3) метрологические; 4) к совместимости затрат времени на решение функциональных задач СТЗ с временными характеристиками технологических циклов; 5) программной и аппаратной совместимости СТЗ и существующей системы управления роботом (СУР); 6) гибкости перенастройки и

перепрограммирования, расширения функциональных возможностей; 7) устойчивости процессов управления; 8) надежности (времени наработки на отказ), ремонтпригодности, самодиагностики; 9) конструктивно-технологические; 10) эксплуатационные; 11) эргономические; 12) технико-экономические.

Требования к уровню «интеллекта» СТЗ определяются перечнем функциональных задач, сформулированных в техническом задании. Они являются определяющими при выборе технических средств реализации поставленных задач, затрат на создание СТЗ, поэтому подлежат тщательному анализу. Рассмотрим характерный пример.

В задании на разработку СТЗ ставится задача классификации и определения ориентации неперекрывающихся объектов, перемещаемых на ленте транспортера. Первоначальное предложение – создание СТЗ на основе передающей телевизионной камеры. Тщательный анализ с учетом размеров объектов, их конфигурации, характерных признаков показал, что та же задача решается с помощью матрицы дискретных датчиков оптической информации. Последнее решение позволяет исключить из состава СТЗ сложную и относительно дорогостоящую систему усиления и преобразования аналогового видеосигнала, а также существенно упростить процедуру перестройки или перепрограммирования СТЗ.

Требования к форме и размерам рабочей зоны СТЗ работа определяются с учетом формы и размеров рабочей зоны манипуляторов робота, перечня функциональных задач. Выбор места расположения датчика текущего изображения (ДТИ) осуществляется с учетом следующих рекомендаций:

а) для упрощения процедуры обработки видеосигналов, устранения перспективных искажений изображений фокальную плоскость ДТИ следует располагать параллельно одной из основных плоскостей или осей системы координат робота;

б) необходимо стремиться к минимальному изменению размеров объектов в поле зрения СТЗ при их перемещении в рабочей зоне;

в) желательно, чтобы наблюдаемые объекты хорошо контрастировали на фоне, не перекрывались и не касались друг друга. При наличии перекрытий необходимо стремиться к их минимизации. Размещение ДТОИ не должно препятствовать производственно-допустимым подходам манипулятора и инструмента;

г) входной зрачок оптической системы ДОО желательно размещать вне зоны воздействия красителей и брызг, стружки, охлаждающих смазочных или расплавленных веществ и т.п.;

д) в необходимых случаях в рабочей зоне робота формируются несколько рабочих сцен или используются несколько точек зрения с различным ракурсом при соответствующем увеличении количества ДОО.

Рабочая область СТЗ может полностью или частично перекрывать рабочую область манипуляторов и технологического оборудования, составлять ее часть или находиться вне ее.

Таким образом, на основе требований к размерам рабочей зоны СТЗ формируются требования к оптической системе, ДОО, осуществляется выбор количества и компоновочной схемы взаимного расположения ДОО, элементов робота и технологического оборудования, источников оптического излучения с учетом возможных экранирующих эффектов.

Требования к совместимости затрат времени на решение функциональных задач СТЗ с временными характеристиками технологических циклов являются решающими при определении необходимых затрат аппаратных и вычислительных ресурсов. На практике встречаются две основные ситуации:

1) СТЗ обеспечивает необходимое быстродействие и не нарушает временные характеристики технологических циклов робототехнических систем;

2) достижение необходимого быстродействия СТЗ экономически целесообразно, поэтому скорость выполнения технологических циклов роботами и оборудование принудительно ограничиваются для согласования с быстродействием СТЗ. Возможна промежуточная ситуация, когда на одних этапах технологического цикла производительность определяется быстродействием СТЗ, а на других – быстродействием робота и технологического оборудования.

Требования к программной и аппаратной совместимости различных блоков СТЗ, а также СТЗ и системы управления робота являются определяющими при выборе структуры, состава аппаратных средств, включая интерфейс между отдельными узлами и внешними устройствами. При разработке структуры СТЗ рекомендуется использовать изделия Государственной системы промышленных приборов (ГСП) и средств автоматизации или изделия, удовлетворяю-

щие стандартам ГСП (после доработки и утверждения ГСП должна войти в систему промышленных приборов, средств вычислительной техники и автоматизации (ППСА), а стандарты ГСП – в Единую систему стандартов приборостроения (ЕССП)). Применение ее изделий, входящих в ГСП, допускается в том случае, если их аналоги в ГСП не удовлетворяют требованиям технического задания или отсутствуют.

Под аппаратной совместимостью понимают а) конструктивную совместимость используемых разъемов, плат, модулей, стоек и других конструкций, б) энергетическую совместимость по напряжениям и токам питания, в) сигнальную совместимость по уровням аналоговых и цифровых сигналов, их временным характеристикам, г) схемотехническую совместимость по назначению линий связи (распайке проводников в разъемах), д) информационную совместимость по потокам управляющих (командных и оповещения), информационных и программных сигналов (временных диаграмм). Информационная совместимость непосредственно связана с программной. Кодирование символьной информации, используемой для ввода программ, команд и числовых данных, обмена сообщениями документации, осуществляется на основе ряда стандартов.

Программная совместимость включает совместимость а) протоколов обмена информацией, б) способов кодирования информации, в) языковую и смысловую совместимости программ пользователей и г) совместимость операционных систем.

Требования к возможности перенастройки и перепрограммирования СТЗ существенно сужают область использования аппаратных средств, значение которых снижается в связи с развитием высокопроизводительной микропроцессорной техники.

Требования к расширению функциональных возможностей СТЗ в процессе их эксплуатации удовлетворяются на этапах схемотехнического проектирования (выделение резервных цифровых и аналоговых каналов для подключения ДИ и исполнительных механизмов, расширение нагрузочной способности интерфейса) и конструкторской проработки (выделение резервных разъемов, мест для установки дополнительных плат в конструктивах).

Требования к устойчивости процессов управления с помощью СТЗ, исключению автоколебательных процессов налагают ограни-

чения на выбор результирующего времени реакции системы СТЗ–СУР–привод ПР T_{Σ} на изменение управляемого параметра:

$$T_{\Sigma} \leq 2M / \omega_c (M + 1), \quad (3.1)$$

где M – показатель колебательности, ω_c – частота среза системы.

Под надежностью СТЗ понимают способность безотказно работать в течение определенного времени. Надежность СТЗ обуславливается безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, долговечностью. В случае экспоненциальной зависимости вероятности отказов от времени $P = 1 - \exp(-\lambda t)$ величина λ определяет интенсивность потока отказов во времени. Для системы, содержащей n элементов с интенсивностями отказов λ_i ($i = 1, \dots, n$), результирующая интенсивность отказов

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (3.2)$$

В настоящее время в робототехнике достигнуты следующие показатели: среднее время наработки на отказ – 100–1000 ч; средний срок службы до капитального ремонта – 2–20 лет; допустимое время непрерывной работы – 16–24 ч. Для обеспечения необходимых показателей надежности в состав технического обеспечения СТЗ должны входить приборы и устройства для наладки и контроля.

К конструкторско-технологическим требованиям относятся простота конструкции, стандартизация и унификация узлов и технологичность их изготовления. К эксплуатационным относятся требования, предъявляемые к рабочей зоне (освещенность), объекту манипулирования (габариты, цвет, конфигурация), окружающей среде (влажность, температура), потребляемой мощности (при допустимых значениях колебаний питающей сети) и быстрдействию СТЗ. Эргономические требования должны обеспечивать удобство работы оператору, обслуживающему СТЗ.

Технико-экономические требования включают в себя выбор и обоснования вариантов технических решений на ранних этапах научно-исследовательских и конструктивных разработок СТЗ, обеспе-

чивающие минимальные затраты на создание и эксплуатацию СТЗ при заданной её точности работы.

3.1.5. Погрешности, обусловленные условиями эксплуатации СТЗ

3.1.5.1. Погрешности, вызванные ориентацией датчика текущего изображения относительно объекта в рабочей зоне

В общем виде анализ влияния ориентации (ракурса) ДТИ на формирование ТИ и, следовательно, на точностные характеристики КСТЗ сопряжен с трудностями описания объектов произвольной формы, расположенных в рабочей зоне, и описания изображения этих объектов, записываемых в накопителе ТИ. С целью упрощения анализа вначале выполним исследование для простого случая: ОМ представляет собой прямоугольный параллелепипед, а изображение ОМ и окружающего его фона на экране накопителя ТИ является бинарным.

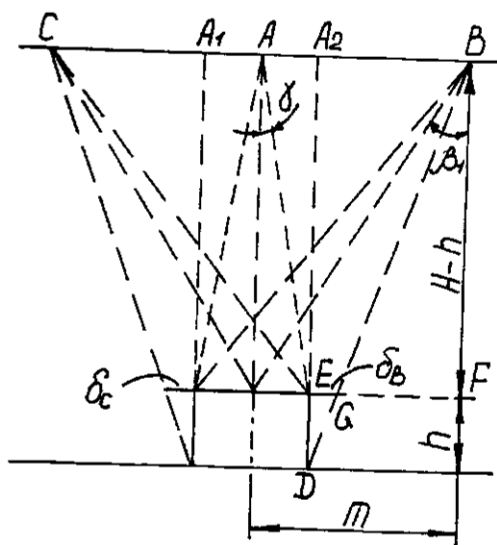


Рис. 3.4. К пояснению формирования несовпадающих частей ТИ

Пусть ДТИ установлен над плоскостью сцены на высоте H , а ОМ, имеющий высоту h , одной из сторон ориентирован вдоль оси ОХ (рис. 3.4).

Оценим изменение сечения ВКФ сравниваемых изображений вдоль соответствующей оси в случае, если ДТИ находится в точке В (или С), а ЭИ соответствует расположению ДТИ в точке А. При определении несовпадающих частей ТИ безразлично, имеет ли ОМ смещение m относительно ДТИ, или смещение по ДТИ на эту величину относительно ОМ. Обозначим через 2_γ угол, под которым виден ОМ из точки А, а через β – угол, соответствующий отклонению линии, соединяющей оптический центр объектива ДТИ и центр верхней грани объекта, от вертикали, перпендикулярной плоскости рабочей зоны. Очевидно, что при расположении ДТИ в любой из точек отрезка [А, А] видимый линейный размер ОМ будет

$$l = 2(H-h)\text{tg}^*. \quad (3.3)$$

При расположении ДТИ вне отрезка [А, А], например в точке В (или С), видимый линейный размер ОМ увеличивается на величину $FG = \delta$, которая легко определяется из совместного рассмотрения треугольников и формулы (3.3):

$$\delta_B = \delta_C = \frac{h(m - \frac{1}{2})}{H} = \frac{h(H-h)\sin(\beta_1 - \gamma)}{H \cos\beta_1 \cos\gamma}. \quad (3.4)$$

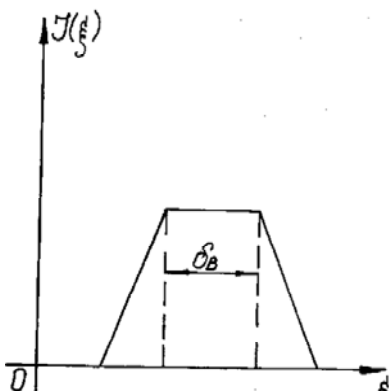


Рис. 3.5. Сечение взаимной корреляционной функции

Из (3.4) следует, что если ЭИ изготовлено при $-\gamma \leq \beta \leq +\gamma$ ($m = 1/2$), а ТИ формируется при $\beta_1 > \gamma$ ($m > 1/2$), то видимые линейные размеры ОМ по соответствующей оси будут различаться на величину δ_B , обуславливающую различные размеры одного и того же ОМ на ЭИ и ТИ, вследствие появления несовпадающей части ТИ относительно ЭИ. Из-за этого у соответствующего сечения ВКФ образуется плоская часть (рис. 3.5), которая вызовет появление систематической ошибки определения продольной координаты центра ОМ, пропорциональной этой величине, но не больше этой величины. Указанная ошибка будет уменьшаться с уменьшением $\delta_B = \delta_C$. Анализ (3.2) показывает, что несовпадающая часть ТИ уменьшается с уменьшением h и m или с уменьшением γ .

Детали автомобилей можно условно разделить на следующие 6 типов:

- 1) прямоугольный параллелепипед (болты, педали, топливные баки, шестерни, корпуса, крышки и др.);
- 2) обелиск (шестерни, крышки, диафрагмы, детали карбюраторов и др.);
- 3) «перевернутый» обелиск (шестерни, конические втулки и др.);
- 4) цилиндрическая трубка (шестерни, втулки, кольца, шайбы, гайки, подшипники и др.);
- 5) цилиндрическая труба с основанием (поршни, корпуса, крышки и др.);
- 6) четырехугольная пирамида (уголки, детали рам и др.).

Технологические заготовки могут быть отнесены к любому из перечисленных типов объектов.

Пользуясь вышеперечисленными объектами, можно синтезировать практически любое изделие. На рис. 3.6 используются следующие обозначения: l и h – длина (диаметр) нижнего основания детали и ее высота соответственно; l_1 и l_2 – длина верхнего основания обелиска и высота боковой грани обелиска; l_3 – высота боковой грани пирамиды; Δ_1 , Δ_2 – толщина боковых стенок; Δ_3 – расстояние между стенками; Δ_4 – толщина основания; Δ_5 – параметр деталей второго и третьего типов.

С целью упрощения анализа по-прежнему считаем, что изображение ОМ и окружающего его фона в накопителе ТИ является бинарным.

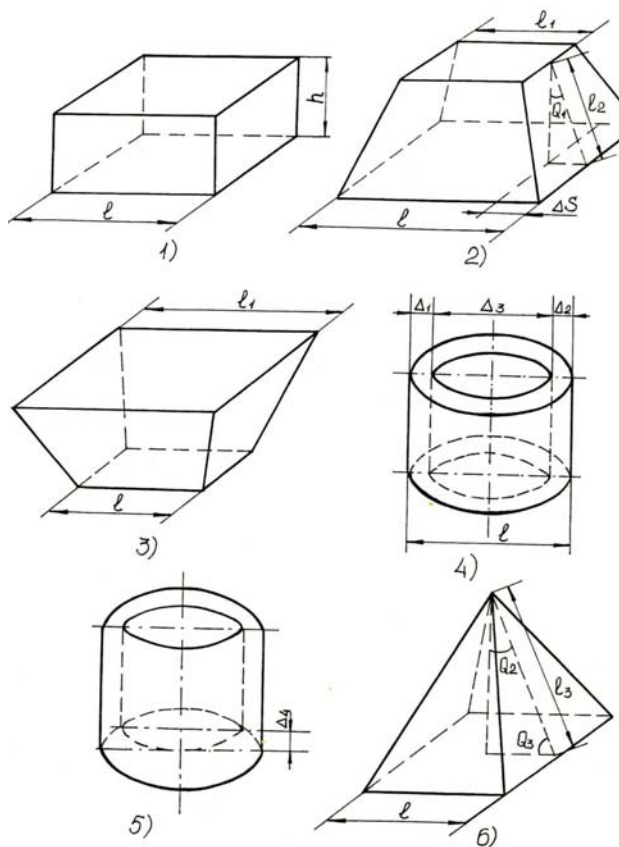


Рис. 3.6. Типы объектов манипулирования

Пусть любой из указанных объектов одной из своих сторон ориентирован вдоль оси OX . Вычислим несовпадающие части ТИ в случае, если ЭИ соответствует расположению датчика ТИ в точке A , а фактически датчик ТИ находится в точке B или C (см. рис. 3.4). При этом объекты могут поступать в рабочую зону КСТЗ с наклоном γ_1 относительно плоскости рабочей зоны (γ_1 – угол между основанием объекта и плоскостью конвейера).

Введем следующие обозначения: $\delta_{A(i)}$, $\delta_{A(i)}^{\gamma_1}$ – линейный размер несовпадающих частей ТИ вдоль оси X при $\gamma_1 = 0$ (датчик в точке А) и соответственно при $\gamma_1 = 0$, $\gamma_1 \neq 0$; $\delta_{B(i)}$, $\delta_{C(i)}$ – упомянутый размер несовпадающих частей ТИ в случае нахождения датчика ТИ в точке В или С при $m > 1/2$ и $\gamma_1 = 0$, $\delta_{B(i)}^{\gamma_1}$, $\delta_{C(i)}^{\gamma_1}$ – тот же размер несовпадающих частей ТИ в случае нахождения датчика ТИ в точках В или С при $m > 1/2$ и $\gamma_1 \neq 0$; Q_1, Q_2, Q_3 – углы, характеризующие конструктивные параметры ОМ второго, третьего и пятого типов; $i = 1, \dots, 6$ – номер типа объекта.

Рисунок 3.7 иллюстрирует формирование несовпадающих частей ТИ для ОМ, изображенных на рис. 3.6. Размеры несовпадающих частей ТИ параллелепипеда определены на рис. 3.4.

Выполняя те же выкладки, получим аналогичные формулы для линейных размеров несовпадающих частей ТИ других типов объектов.

Из рассмотрения рис. 3.7, а следует, что

$$\delta_{A(2)} = 0; \delta_{B(2)} = \delta_{C(2)} = \begin{cases} \frac{h(m - \frac{1}{2})}{H}, & \text{при } \beta_2 < Q_1; \\ \frac{1 - l_1}{2} + \frac{h(m - \frac{1}{2})}{H}, & \text{при } \beta_2 \geq Q_1, \end{cases} \quad (3.5)$$

где $\beta_2 = \arctg \left[\frac{\frac{1}{2} + m}{H} \right]$ – угол между перпендикуляром, опущенным

из оптического центра объектива датчика ТИ на плоскость сцены, и прямой, проведенной из указанной точки к дальней точке верхнего основания объекта.

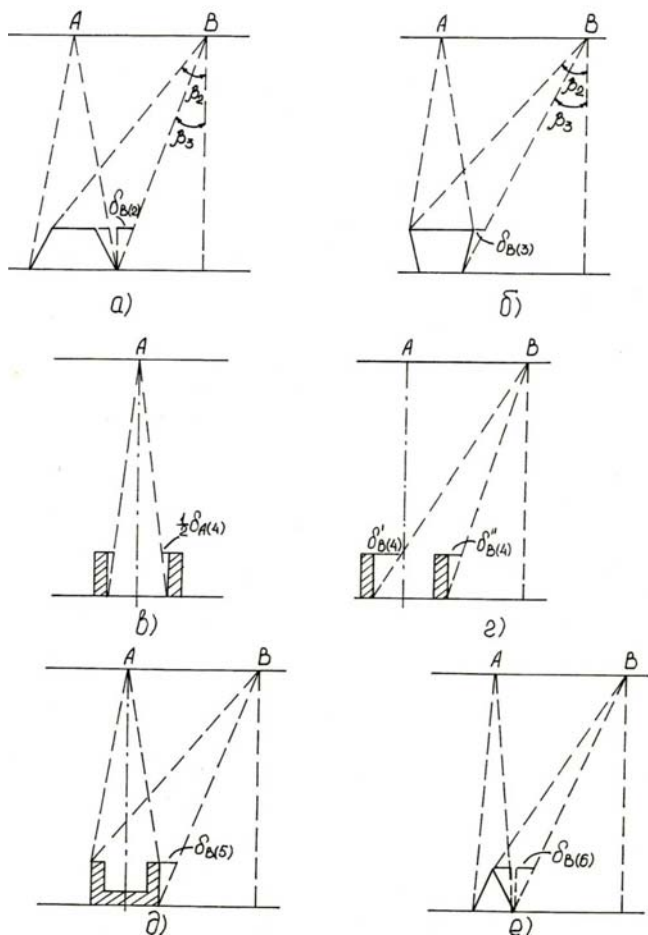


Рис. 3.7. К пояснению формирования несовпадающих частей ТИ

Из (3.4) следует, что наибольший размер несовпадающих частей ТИ получается при $\beta_2 > Q$, когда часть ТИ исчезает и появляется новая часть.

Из рис. 3.7, б нетрудно определить линейный размер несовпадающих частей ТИ объектов третьего типа:

$$\delta_{A(5)} = 0; \delta_{B(3)} = \delta_{C(3)} = \frac{h(m - \frac{1}{2})}{H} - \Delta_5, \text{ при } \beta_2 > Q_1, \quad (3.6)$$

где β – угол между перпендикуляром, опущенным из оптического центра объектива датчика ТИ на плоскость рабочей зоны, и прямой, проведенной из указанной точки к ближней точке нижнего основания ОМ.

Размер несовпадающих частей ТИ объекта четвертого типа вычисляется следующим образом (рис. 3.7, в, з):

$$\begin{aligned} \delta_{A(4)} &= \frac{h}{H}(1 - \Delta_1 - \Delta_2), \text{ при } \Delta_1 \neq \Delta_2; \\ \delta_{A(4)} &= \frac{2h(\frac{1}{2} - \Delta_1)}{H} = \frac{\Delta_3 h}{H}, \text{ при } \Delta_1 = \Delta_2; \\ \delta_{B(4)} &= \delta'_{B(4)} + \delta''_{B(4)} = \frac{h(2m - \Delta_1)}{H}; \delta_{C(4)} = \frac{h(2m - \Delta_2)}{H}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Пользуясь этими формулами, можно вычислить размеры несовпадающих частей ТИ объекта типа цилиндрическая труба, в которой внешние и внутренние окружности центрированы ($\Delta_1 = \Delta_2$) или нецентрированы ($\Delta_1 \neq \Delta_2$). Формулы (3.7) соответствуют наихудшему случаю, когда ЭИ – негатив чертежа проекции объекта (т.е. $h = 0$), а ТИ соответствует расположению датчика ТИ в точках А, В, С и реальные размеры объекта ($h \neq 0$).

На рис. 3.8 приведена зависимость $\delta_{A(4)}$ от отношения h/H , полученная для случая установки датчика ТИ в точке А. Видно, что $\delta_{A(4)}$ увеличивается при уменьшении высоты и размещения ДТИ и фиксированной высоты h объекта.

Размеры несовпадающих частей ТИ пятого типа ОМ определяются аналогично размерам несовпадающих частей ТИ параллелепипеда (рис. 3.7, д):

$$\delta_{A(5)} = \delta_{A(1)}; \delta_{B(5)} = \delta_{B(1)}; \delta_{C(5)} = \delta_{C(1)}. \quad (3.8)$$

Для пирамиды линейный размер несопадающих частей ТИ вдоль оси ox равен (см. рис. 3.7, e):

$$\delta_{A(6)} = 0; \delta_{B(6)} = \delta_{C(6)} = \frac{1}{2} + \frac{h(m - \frac{1}{2})}{H}, \text{ при } \beta_2 \geq Q_2. \quad (3.9)$$

При $\beta_2 < Q_2$ размеры несопадающих частей определяются только вторым слагаемым правой части формулы (3.9).

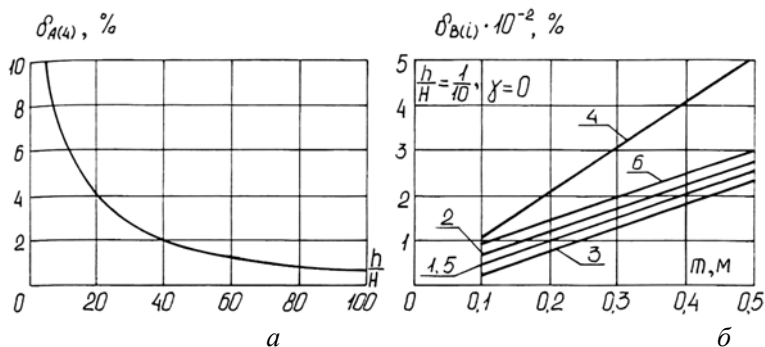


Рис. 3.8. Графики зависимости

На рис. 3.8 приведены графики, построенные по формулам (3.2), (3.4), (3.8). Здесь по оси абсцисс отложены значения смещений m , а по оси ординат – размеры несопадающих частей объектов; цифры на графиках обозначают номера типов ОМ. Из графиков следует, что наибольшие размеры несопадающих частей имеют типы объектов со сквозными отверстиями, ориентированные (конструктивно или из-за расположения ОМ на конвейере) по направлению датчика ТИ. Объекты третьего типа формируют ТИ с наименьшими размерами несопадающих частей ТИ при поступлении ОМ на конвейер с наклоном γ_1 . На рис. 3.9 показан параллелепипед с углом наклона γ_1 к плоскости сцены.

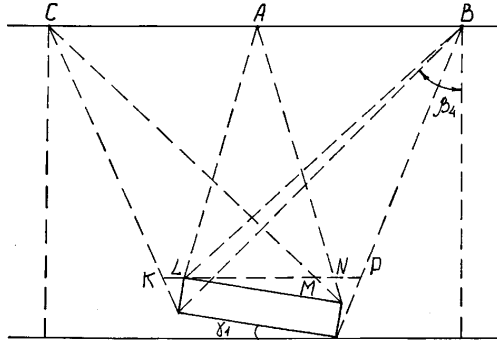


Рис. 3.9. К определению несовпадающих частей при наклоне объекта в рабочей зоне

В данном случае на ТИ будут получаться несовпадающие части при нахождении датчика ТИ не только в точках В, С, но и в точке А. Используя методы геометрической оптики и опуская громоздкие выкладки, получим для линейных размеров несовпадающих частей ТИ параллелепипеда следующие выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{A(1)}^{\gamma_1} = 1 - LN = 1 \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\cos \gamma_1} - \sin \gamma_1 \left(\frac{1}{2} + h \cos \gamma_1 \right) \right] \right\}; \\ \delta_{B(1)}^{\gamma_1} = Lp - 1 = \frac{1 + h \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{\cos \gamma_1} \right) - \gamma_1 \right]}{\cos \gamma_1} - 1; \\ \delta_{C(1)}^{\gamma_1} = 1 - KM = h \left[\sin \gamma_1 + \cos \gamma_1 \left(\frac{m - \frac{1}{2} - \sin \gamma_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{H - l \sin \gamma_1} \right) \right] + \\ + 1 \left[1 - \cos \gamma_1 - \frac{\sin \gamma_1 \left(m + \frac{1}{2} - h \sin \gamma_1 \right)}{H - h \cos \gamma_1} \right]. \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Аналогично для линейных размеров несовпадающих частей ТИ других типов объектов справедливы следующие формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{A(2)}^{\gamma_1} = 1 \left\{ 1 - \cos \gamma_1 - \frac{1 \sin \gamma_1}{2H} \right\}; \\ \delta_{B(2)}^{\gamma_1} = 1 \left[1 - \cos \gamma_1 - \frac{\sin \gamma_1 \left(m - \frac{1}{2} \right)}{H} \right]; \\ \delta_{C(2)}^{\gamma_1} = 1 \left[1 - \cos \gamma_1 - \sin \gamma_1 \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{H} \right) \right]; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{A(3)}^{\gamma_1} = 1 \left\{ 1 - \cos \gamma_1 - \sin \gamma_1 \left[\frac{\frac{1}{2} + l_2 \sin(Q_1 + \gamma_1)}{H - l_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - Q_1 - \gamma_1\right)} \right] \right\}; \\ \delta_{B(3)}^{\gamma_1} = 1 \left\{ 1 - \cos \gamma_1 - \frac{\sin \gamma_1 \left[m - l_2 \sin(Q_1 + \gamma_1) \right]}{H - l_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - Q_1 - \gamma_1\right)} \right\}; \\ \delta_{C(3)}^{\gamma_1} = 1 \left\{ 1 - \left[\cos \gamma_1 - \sin \gamma_1 \frac{m + \frac{1}{2} + l_2 \sin(Q_1 + \gamma_1)}{H - l_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - Q_1 - \gamma_1\right)} + \frac{m - \frac{1}{2} - l_1 \sin g_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{H - l_1 \sin \gamma_1} - \operatorname{tg}(Q_1 - \gamma_1) \right] \right\}; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \delta_{A(4)}^{\gamma_1} = \frac{h}{H} \Delta_3 + 1 \left[1 - \cos \gamma_1 + \frac{\left(\frac{1}{2} + h \sin \gamma_1 \right)}{H - h \cos \gamma_1} \right]; \\
 \delta_{B(4)}^{\gamma_1} = h \left[\operatorname{tg}(\beta_3 - \gamma_1) + \operatorname{tg}(Q_4 - \gamma_1) \right]; \\
 \delta_{C(4)}^{\gamma_1} = 2 \sin \gamma_1 + h \cos \gamma_1 h \left[\frac{m + \frac{1}{2} - \Delta_1 \cos \gamma_1}{H - \Delta_1 \sin \gamma_1} + \frac{1 \left(\frac{m}{2} + \frac{1}{2} - \cos \gamma_1 \right)}{H - 1 \sin \gamma_1} \right]; \\
 Q_4 = \operatorname{arctg} \left[\frac{m - \frac{1}{2} + (1 - \Delta_1) \cos \gamma_1}{H - (1 - \Delta_1) \sin \gamma_1} \right]; \\
 \delta_{A(5)}^{\gamma_1} = \delta_{A(1)}^{\gamma_1}; \delta_{B(5)}^{\gamma_1} = \delta_{B(1)}^{\gamma_1}; \delta_{C(5)}^{\gamma_1} = \delta_{C(1)}^{\gamma_1};
 \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \delta_{A(6)}^{\gamma_1} = 1(1 - \cos \gamma_1); \\
 \delta_{B(6)}^{\gamma_1} = 1 \left[1 - \cos \gamma_1 - \sin \gamma_1 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{H} \right) \right], \text{ при } \beta_4 < Q_2 + \gamma_1; \\
 \delta_{C(6)}^{\gamma_1} = 1 \left[\frac{1}{2} + 1_3 \cos \left(\frac{\pi}{4} - Q_3 + \gamma_1 \right) \left(\frac{\frac{m}{2} + \frac{1}{2} - \cos \gamma_1}{H - 1 \sin \gamma_1} \right) \right].
 \end{array} \right.$$

Здесь β_4 – угол между перпендикуляром, опущенным из оптического центра объектива датчика ТИ на плоскость рабочей зоны, и прямой, проведенной из указанной точки к дальней точке нижнего основания ОМ (см. рис. 3.9).

На основе приведенных выше соотношений, предполагая характеристики объектов и их ориентацию относительно датчика ТИ известными, можно вычислить линейные размеры несовпадающих

частей ТИ и, следовательно, получить систематическую составляющую ошибки определения координат ОМ на сцене.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Если объект смещен относительно датчика ТИ, то несовпадающие части имеют наибольшие размеры на ТИ объектов со сквозными отверстиями, ориентированными по направлению к датчику ТИ, а наименьшие размеры имеют несовпадающие части ТИ объектов типа «перевернутый» обелиск.

2. Если смещение объекта относительно датчика ТИ отсутствует, то несовпадающие части на ТИ не формируются за исключением двух случаев: объект имеет сквозные отверстия, ориентированные по направлению к датчику ТИ, или объект имеет наклон относительно плоскости рабочей зоны.

3. Размеры несовпадающих частей на ТИ объекта уменьшаются при уменьшении ее высоты и смещения относительно датчика ТИ или с уменьшением углового размера объекта.

3.1.5.2. Погрешности, вызванные неравномерностью освещенности объекта в рабочей зоне

Очевидно, что освещенность рабочей зоны с объектом как-то сказывается на качестве ТИ, что, в свою очередь, оказывает влияние на ВКФ сравниваемых изображений и, таким образом, проявляется в точностных характеристиках КСТЗ. Сравнительно просто данное влияние оценивается по величине несовпадающих частей ТИ. Ранее уже отмечалось, что размеры несовпадающих частей позволяют примерно определить величину соответствующих погрешностей КСТЗ. Здесь вычисляются размеры несовпадающих частей на изображениях ОМ. Рассматриваются два случая: объекты, окрашенные в черный цвет, находятся в рабочей зоне, поверхность которой окрашена в белый цвет, и, наоборот, объекты, окрашенные в белый цвет, находятся в рабочей зоне, окрашенной в черный цвет. Затем оценивается влияние полутонового фона поверхности конвейера на ВКФ сравниваемых изображений.

Оценим влияние неравномерности освещенности в случае, когда ОМ черного цвета расположена на белой поверхности, а единственный источник света совмещен с датчиком ТИ. Очевидно, что несовпадающие части ТИ, размеры которых зависят от степени искажения

контуров изображения ОМ, будут определяться одинаково для первого, третьего и пятого типов ОМ. Поэтому в данном случае ограничимся вычислением несовпадающих частей ТИ прямоугольного параллелепипеда. Очевидно также, что несовпадающие части ТИ второго и шестого типов объектов будут меньших размеров, чем у параллелепипеда, так как из-за наклона боковых стенок эти объекты имеют меньшую тень.

Рисунок 3.10, *а* иллюстрирует сказанное. Здесь несовпадающая часть ТИ параллелепипеда равна отрезку DF, а несовпадающая часть ТИ объекта второго типа равна отрезку EF. Однако наибольшие размеры имеют ОМ четвертого типа, так как несовпадающая часть в этом случае состоит из двух отрезков. Рисунок 3.10, *б* соответствует указанному случаю. Здесь несовпадающая часть состоит из отрезков GH и KL. Поэтому оценим размеры несовпадающих частей на ТИ только первого и четвертого типов объектов. На основе методов геометрической оптики для линейных размеров несовпадающих частей вдоль оси ОХ ТИ первого и четвертого типов ОМ

$$\begin{aligned} \delta_{A(1)}^O &= \frac{2h}{H-h}; \delta_{B(1)}^O = \delta_{C(1)}^O = \frac{h\left(\frac{1}{2} + m\right)}{H-h}; \delta_{A(4)}^O = \delta_{A(1)}^O; \\ \delta_{B(4)}^O &= \frac{h(2m - \Delta_1)}{H-h}; \delta_{C(4)}^O = \frac{h(2m - \Delta_2)}{H-h}, \text{ при } \Delta_1 \neq \Delta_2; \\ \delta_{B(4)}^O &= \delta_{C(4)}^O = \frac{h}{H-h} \left(2m - \frac{1 - \Delta_3}{2}\right), \text{ при } \Delta_1 = \Delta_2. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Из (3.12) следует, что несовпадающая часть имеется на ТИ и в случае $m = 0$. Это иллюстрирует рис. 3.10, *в*, где несовпадающая часть изображена в виде отрезков MN и PT.

Если ОМ белого цвета размещен на черной поверхности, то несовпадающие части образуются только для объектов пятого типа. Для этого типа ОМ $\delta_{A(5)}^0 = 0$, а при $m > 1/2$.

$$\delta_{B(s)}^O = \frac{1}{H-h} \left[h \left(\frac{1}{2} + m \right) + (h - \Delta_4) \left(m - \frac{1}{2} + \Delta_1 \right) \right];$$

$$\delta_{C(s)}^O = \frac{1}{H-h} \left[h \left(\frac{1}{2} + m \right) + (h - \Delta_4) \left(m - \frac{1}{2} + \Delta_2 \right) \right].$$
(3.13)

Соотношения (3.11) и (3.12) при известных характеристиках объекта, заданном его смещении в рабочей зоне и заданной точности определения координат объекта позволяют сформулировать требования к расположению источников света над рабочей зоной.

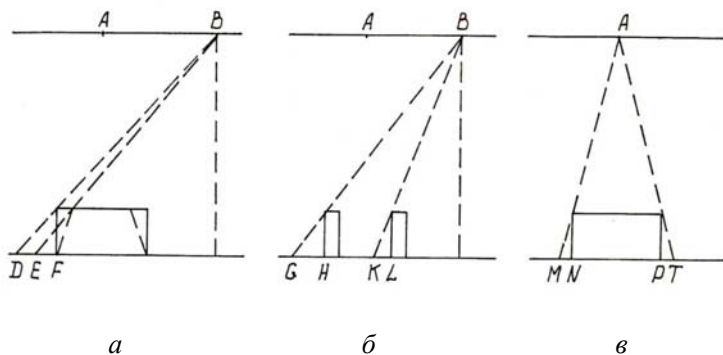


Рис. 3.10. К определению несовпадающих частей ТИ объектов при неравномерной освещенности рабочей зоны

Из анализа выражений для размеров несовпадающих частей ТИ, появляющихся из-за неравномерности освещенности рабочей зоны, следует, что данный фактор оказывает существенное влияние на точностные характеристики КСТЗ. Поэтому следует уделять особое внимание расположению источников света в окрестности рабочей зоны и созданию равномерной освещенности сцены.

Оценим влияние фона рабочей зоны на ВКФ сравниваемых изображений. Пусть ТИ и ЭИ описываются следующими функциями:

$$\begin{aligned}
 F_1(x_1, y_1) &= \begin{cases} F_{1g}(x_1, y_1), & \text{если } x_1, y_1 \subset S_{gm}; \\ F_{1k}(x_1, y_1), & \text{если } x_1, y_1 \subset S_m \setminus S_{gm}; \end{cases} \\
 F_2(x_2, y_2) &= \begin{cases} F_{2g}(x_2, y_2), & \text{если } x_2, y_2 \subset S_{g\exists}; \\ F_{2k}(x_2, y_2), & \text{если } x_2, y_2 \subset S_{\exists} \setminus S_{g\exists}. \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

где $F_1(x_1, y_1)$, $F_2(x_2, y_2)$ – функции, описывающие соответственно ТИ объекта на экране накопителя ТИ и фон рабочей зоны с объектом на том же экране; $F_{2g}(x_2, y_2)$, $F_{2k}(x_2, y_2)$ – функции, описывающие соответственно ЭИ объекта и фон рабочей зоны, на котором зафиксировано изображение ОМ; S_m , S_{\exists} – соответственно площадь экрана накопителя ТИ и площадь ЭИ; S_{gm} , $S_{g\exists}$ – площади, занятые изображениями объекта соответственно на экране накопителя ТИ и на ЭИ. Предположим, что $S_{\exists} = S_m = S$, а $S_{g\exists} = S_{gm} = S_g$, тогда ВКФ равна

$$J(x, h, a) = \int_s F_1(x_1, y_1) F_2(x_2, y_2) ds = J_0 + J_1 + J_2 + J_3,$$

где

$$\begin{aligned}
 J_0 &= \int_{s_g} F_{1g}(x_1, y_1) F_{2g}(x_2, y_2) ds; \quad J_1 = \int_{s/s_g} F_{1k}(x_1, y_1) F_{2g}(x_2, y_2) ds, \\
 J_2 &= \int_{s/s_g} F_{1g}(x_1, y_1) F_{2k}(x_2, y_2) ds; \quad J_3 = \int_{s/s_g} F_{1k}(x_1, y_1) F_{2k}(x_2, y_2) ds.
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Слагаемое J_0 (3.15) содержит полезную информацию об искомым координатах главного максимума ВКФ, а слагаемые J_1 , J_2 , J_3 обуславливают влияние фона ЭИ и неравномерной освещенности рабочей зоны с ОМ на точность оценки координат. Ясно, что слагаемые J_1 , J_2 , J_3 могут не только исказить положение главного максимума ВКФ, но и образовать ложный максимум ВКФ, конкурирующий по значению с главным максимумом ВКФ или даже превышающий его. Это приведет к сбою в работе КСТЗ.

Анализ выражения (3.15) показывает, что если, во-первых, значения функций F_{1g} и F_{2g} превышают соответствующие значения

функций F_{1k} и F_{2k} (изображения ОМ контрастны и резко выделяются на фоне рабочей зоны) и, во-вторых, объект малогабаритный ($S_g \ll \ll S$), то даже при малых значениях слагаемых J_1 и J_2 наибольшее значение слагаемого J_3 может превысить величину главного максимума J . Это приведет к сбою в работе КСТЗ.

Исключить или уменьшить влияние фона ЭИ и неравномерности освещенности рабочей зоны на точностные характеристики КСТЗ можно путем специальных преобразований ТИ и ЭИ, при которых $F_{1k} \Rightarrow 0$, $F_{2k} \Rightarrow 0$. Одним из таких путей является представление ТИ и ЭИ в виде бинарных изображений.

3.1.6. Погрешности, вызванные ошибками установки датчика текущего изображения

При размещении датчика ТИ в рабочей зоне могут возникнуть погрешности КСТЗ из-за параллельного переноса оптической оси, проходящей через объектив датчика ТИ, и наклона этой оси относительно рабочей зоны на угол φ . Здесь N_k – плоскость рабочей зоны, N – главная плоскость объектива I , N_g – светочувствительная поверхность фотоприемника датчика ТИ. Из рис. 3.11 следует, что ошибки δ_{gx} , δ_{gy} , определения линейных координат возникают за счет смещения δ_{cx} , δ_{cy} по соответствующим осям системы координат $X_1O_1Y_1$, связанной с плоскостью ТИ, и наличия несовпадающих частей $\delta_{\varphi x}$, $\delta_{\varphi y}$ на ТИ. То есть величины δ_{gx} , δ_{gy} определяются следующим образом:

$$\delta_{gx} = \delta_{cx} + \delta_{\varphi x}; \quad \delta_{gy} = \delta_{cy} + \delta_{\varphi y}; \quad (3.16)$$

$$\delta_{gx} = C_{gx} + Htg\varphi_x; \quad \delta_{gy} = C_{gy} + Htg\varphi_y; \quad (3.17)$$

$$\delta_{\varphi x} = l'_x - l'_{\varphi x}; \quad \delta_{\varphi y} = l'_y - l'_{\varphi y}. \quad (3.18)$$

Здесь C_{gx} , C_{gy} – ошибки определения координат, возникающие за счет переноса датчика ТИ параллельно оси OZ ; l'_x , l'_y – линейные размеры изображения (по соответствующим осям), проецируемого на плоскость N_g , при $N \perp OZ$; $l'_{\varphi x}$, $l'_{\varphi y}$ – линейные размеры иска-

женного изображения (проецируемого на плоскость N_g при $N_g \perp OZ$), т.е. $l'_{\phi x} = l'_x \cos j_x$, $l'_{\phi y} = l'_y \cos \phi_y$; ϕ_x, ϕ_y – углы наклона датчика ТИ, обуславливающие появление ошибок по соответствующим осям.

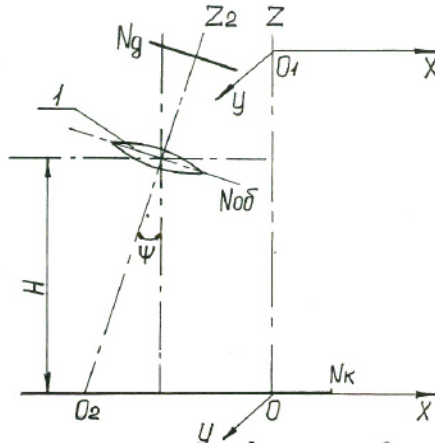


Рис. 3.11. Иллюстрация погрешности установки ДТИ

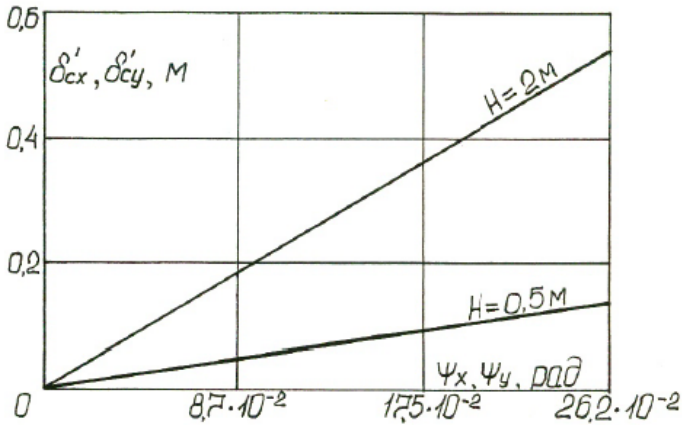


Рис. 3.12. К определению погрешностей $\delta'_{sx}, \delta'_{sy}$

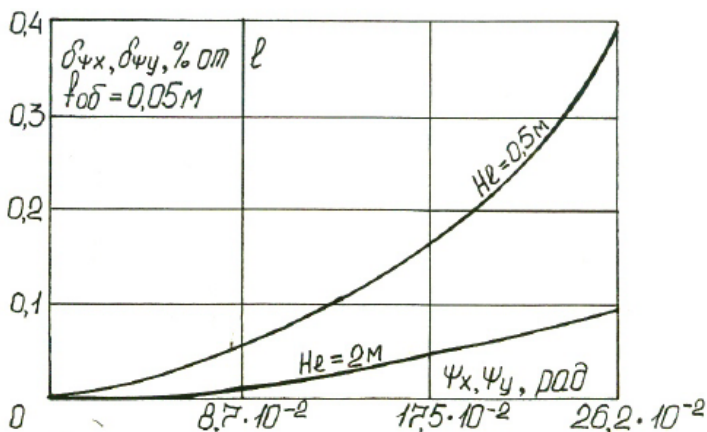


Рис. 3.13. К определению погрешностей $\delta\psi_x, \delta\psi_y$

Подставляя (3.16), (3.17) в (3.18) и используя выражения для определения l'_x, l'_y , получим

$$\delta_{gx} = C_{gx} + H \operatorname{tg} \varphi_x + \frac{1_x f_{об}}{H_e - f_{об}} (1 - \cos \varphi_x); \quad (3.19)$$

$$\delta_{gy} = C_{gy} + H \operatorname{tg} \varphi_y + \frac{1_y f_{об}}{H_e - f_{об}} (1 - \cos \varphi_y), \quad (3.20)$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива, а l_x и l_y – линейные размеры проекций ОМ на оси ОХ и ОУ.

Выражения (3.19) и (3.20) позволяют определить допустимые значения углов φ_x, φ_y для заданной величины δ_{gx}, δ_{gy} .

На рис. 3.12, 3.13 приведены графики для вторых (δ_{cx}, δ_{cy}) и третьих ($\delta_{\varphi_x}, \delta_{\varphi_y}$) слагаемых выражений (3.19), (3.20) в зависимости от значений углов φ_x, φ_y при различных H и $H = H - h$.

Из выражений (3.19), (3.20) и графиков рис. 3.12, 3.13 следует, что наибольший вклад в δ_{gx}, δ_{gy} – систематические составляющие ошибки определения координат объекта, вносят величины C_{gx}, C_{gy} и

C'_{cx} , C'_{cy} , возникающие за счет смещений по соответствующим осям системы координат $XOYZ$, связанной с рабочей зоной, а наименьший вклад вносят величины δ_{ϕ_x} , δ_{ϕ_y} , характеризующие несовпадающие части ТИ. При этом величины C'_{cx} , C'_{cy} прямо пропорциональны H , а δ_{ϕ_x} , δ_{ϕ_y} – обратно пропорциональны H_e .

Компенсировать погрешности δ_{gx} , δ_{gy} и δ'_{cx} , δ'_{cy} можно с помощью специальных устройств компенсации или путем подготовки ЭИ, соответствующего значениям H_e и ϕ_x , ϕ_y , при которых ЭИ и ТИ будут иметь минимум δ_{ϕ_x} , δ_{ϕ_y} , либо путем выбора нового начала системы координат $XOYZ$; при этом необходимо соблюдать условие

$$\begin{aligned} \Delta X_{\max} + C_{gx} + C'_{cx} &\geq \Delta X_{\Gamma}; \\ \Delta Y_{\max} + C_{gy} + C'_{cy} &\geq \Delta Y_{\Gamma}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

где ΔX_{\max} , ΔY_{\max} – максимальные допустимые смещения ОМ в плоскости рабочей зоны, определяемые характеристиками КСТЗ; ΔX_{Γ} , ΔY_{Γ} – граничные значения смещений ОМ в плоскости рабочей зоны, задаваемые характером технологического процесса.

3.2. Алгоритмы обработки зрительной информации в СТЗ

3.2.1. Обобщенный алгоритм обработки зрительной информации

Рассматривая алгоритмы процесса обработки зрительной информации в СТЗ, изложенные в [1, 2], представим обобщенный алгоритм блок-схемой (рис. 3.14), который можно разделить на следующие основные этапы: формирование, предварительная обработка, сегментация, описание и анализ изображения. Удельный вес каждого из этапов, которые, в свою очередь, могут быть разбиты на различные подэтапы, неодинаков в конкретных реальных задачах. Иногда отдельные этапы могут совмещаться или вообще отсутствовать. Схема содержит обратную связь между этапами алгоритма и представляет собой итеративный характер обработки видеoinформации в СТЗ.

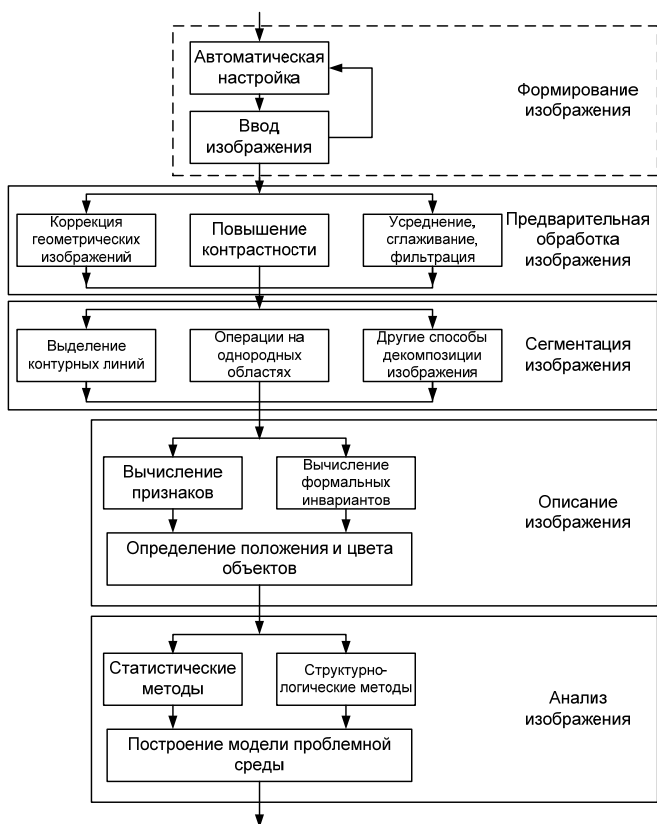


Рис. 3.14. Блок-схема алгоритма обработки зрительной информации в СТЗ

Следует подчеркнуть, что на всех этапах, показанных на схеме (и даже еще ранее – при формулировке задачи на содержательном уровне), необходимо стремиться максимально упростить функции СТЗ, поскольку, несмотря на бурный прогресс микропроцессорных средств, их возможностей пока недостаточно для решения классических зрительных задач в полном объеме применительно к реальным сценам. В связи с этим повсеместно развиваются методики упрощения таких задач, основанные, в частности, на следующих принципах: сведении трехмерных сцен к двумерным проекциям, переходе

от многоградационных изображений к бинарным, использовании дополнительной информации от других типов датчиков информации – тактильных, силомоментных, локационных и др. (например, вместо сложной процедуры анализа стереоизображений от пары телекамер применяется сочетание одной телекамеры с дальнометрическим или иным датчиком расстояния); перемещении объектов относительно датчиков информации (и наоборот) для получения дополнительной полезной информации; организации специального освещения (например, рассеянный свет устраняет тени и блики, а управляемая поочередная подсветка с разных сторон объекта обеспечивает получение дополнительной информации об исследуемом объекте и т.п.).

Рассмотрим подробнее этапы обработки видеоинформации, используя наиболее применяемые алгоритмы работы СТЗ, описанные в литературе.

3.2.2. Формирование изображений

Под изображением рабочей сцены будет пониматься [1, 2] «функция яркости» $g(x, y)$, $x \in [O, X]$, $y \in [O, Y]$ выбранной плоской проекции размера XU , где введена система координат Oxy . Обычно в память ЭВМ исходное изображение $g(x, y)$ вводится в виде массива значений функцией $G(i, j)$, заданной на целочисленной решетке $i = \overline{O, N_x}$, $j = \overline{O, N_y}$, наложенной на всю область XU или на некоторую ее подобласть. Значение G в точке представляет среднюю яркость элемента изображения в окрестности этой точки. Как правило, рассматриваются прямоугольные элементы изображения, хотя возможны и другие способы разбиения поля зрения.

Если входной и выходной информацией некоторого этапа (или подэтапа) являются изображения, причем изображение на выходе этапа представляет собой в каком-то смысле «улучшенное» преобразование входного, то имеет место обработка изображения. Если же входной информацией является изображение, а выходной – определенная совокупность его количественных или качественных характеристик, то речь идет об описании изображения. Этап формирования изображения включает в себя подэтапы автоматической на-

стройки системы и собственно ввода изображения в ЭВМ (в случае использования ЭВМ).

Настройка системы. В современных СТЗ, управляемых ЭВМ, можно автоматизировать «наведение датчика информации на нужный фрагмент сцены – выбор поля зрения и фокусировку видеокамеры, установку требуемой яркости и (или) контрастности, подбор наилучших условий освещенности, светофильтров и т.д. Алгоритмы автоматической настройки зависят от конкретных типов объектов, датчиков информации, источников света, оборудования рабочей среды, аппаратных средств стыковки с ЭВМ и многих других факторов. Так, при работе со смещающимися объектами (например, на конвейере) «наведение» камеры (линейки фотоприемников) заключается в выборе момента съема информации, часто определяемого с помощью дополнительных датчиков информации. В случае изолированных объектов определяется такое расположение камеры, при котором объекты целиком попадают в заданную рамку, в других случаях рамку можно «привязывать» к некоторой характерной точке объекта. Для наведения используются отличия изображений объекта и фона, например, такие, при которых текстура изображения бункера с деталями резко отличается от текстуры фона.

При автоматической фокусировке оптической системы следует повысить уровень высокочастотных компонент пространственного спектра изображения, например, максимизируют площадь, занятую элементами с градиентом, который выше заданного порога.

В литературе описаны методики настройки, калибровки и нормировки различных типов СТЗ, использующих различные датчики информации. Не останавливаясь подробно на этих вопросах, следует отметить, что в алгоритмах автоматической настройки и масштабирования большую роль играют «модели камеры», описывающие геометрические и физические преобразования воспринимаемой сцены в изображение и позволяющие в той или иной степени учесть различные искажения, возникающие из-за параллакса, нелинейности и неоднородности характеристик датчиков и других факторов. Особое место занимают методы полуавтоматической настройки СТЗ с участием оператора (человека), в том числе методы, базирующиеся на современных системах автоматизированного проектирования и машинной графики.

Ввод изображения. Оцифровка изображения при его вводе в память ЭВМ производится с использованием стандартных аналого-цифровых преобразователей или компараторов. Максимальный шаг (h) пространственной решетки при отсчетах исходного изображения $g(x, y)$ в виде функции $G(i, j)$ должен выбираться из условия $h < 1/2 f_m$, где f_m – максимальная пространственная частота изображения. После квантования функция $G(i, j)$ принимает целочисленные значения $G(i, j) = k$ при $T_{k-1} \leq G(i, j) < T_k$, $k \in [0, k_{\max}]$, где T_k – значение k -го порогового уровня. При $k_{\max} = 1$ изображение $G(i, j)$ называется бинарным (черно-белым), при $k_{\max} > 1$ – многоградационным (полутоновым).

Рассмотрим методы ввода бинарных изображений, которые более широко распространены в СТЗ промышленных роботов. Будем считать, что объектам соответствуют единичные значения яркости, фону – нулевые. В простейшем случае используется единственное постоянное значение порога бинаризации T для всего поля зрения. При более общем подходе порог зависит от координат (i, j) , самого изображения $G(i, j)$ и некоторых его локальных свойств, описываемых функцией $p(i, j)$: $T = T[i, j, G(i, j)p(i, j)]$. Порог бинаризации T называют глобальным, если он определяется только изображением, т.е. $T = T[G(i, j)]$, локальным, если $T = T[G(i, j), p(i, j)]$. Если же порог является функцией всех перечисленных аргументов, включая координаты (i, j) , он называется динамическим.

Для автоматического выбора глобального порога бинаризации в СТЗ обычно используется перепад яркости, соответствующий переходу от уровня яркости объекта до уровня яркости фона сцены. Этот метод хорошо работает при достаточной контрастности изображений объектов и фона, когда они имеют приблизительно постоянные и различающиеся друг от друга яркости. При невозможности обеспечить выполнение этого условия приходится «улучшать» гистограммы, проводя их предварительное сглаживание и присваивая веса вклада точек изображения в гистограмму в зависимости от амплитуд градиента яркости $\nabla G(i, j)$ в этих точках. В дискретном случае модуль вектора градиента функции яркости $\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}$ часто оценивают с помощью операторов Робертса как

$$|\nabla G(i, j)| \sim \sqrt{[G(i, j) - G(i+1, j+1)]^2 + [G(i+1, j)] - G(i, j+1)]^2} \quad (3.22)$$

или

$$|\nabla G(i, j)| \sim [G(i, j) - G(i+1, j+1)] + [G(i+1, j)] - G(i, j+1), \quad (3.23)$$

где i, j – координаты точки яркости изображения.

Возможны и другие оценки $|\nabla G(i, j)|$. Ясно, что элементы изображения, где значение $|\nabla G(i, j)|$ велико, должны лежать в окрестности границы между фоном и объектом: среднее значение их уровня яркости может быть использовано в качестве глобального порога T . Напротив, чем меньше модуль градиента яркости элемента изображения, тем с большей вероятностью он лежит внутри объекта или фона и тем с большим весом следует его включать в гистограмму для получения четко выраженных пиков. Существует ряд модификаций способа назначения весов и вообще учета градиента яркости. Еще один метод состоит в выборе порога T на том уровне яркости k , для которого максимальна величина

$$d_k = \sum_{i, j \in s_k} |\nabla G(i, j)|, \quad (3.24)$$

где s_k – множество точек, в которых уровень яркости отвечает числу k градаций яркости.

В [2] подбирались постоянные пороги по яркости T и градиенту ε , но бинаризация осуществлялась согласно условию

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } G(i, j) \geq T \wedge |\nabla G(i, j)| \leq \varepsilon, \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (3.25)$$

Если же, как это часто бывает на практике, диапазоны яркости фона и объектов существенно перекрываются, можно использовать два глобальных пороговых значения T_H и T_B , характеризующих соот-

ветственно уровень яркости фона и объекта: элементы, для которых $G(i, j) < T_H$, точно относятся к фону, элементы с $G(i, j) > T_B$ – к объекту, а «сомнительный» элемент, где $T_H \leq G(i, j) \leq T_B$, можно, например, отнести к тому классу, куда пошло большинство его уже расклассифицированных «соседей».

Фактически учет «соседей» означает использование локального порога. Обычно применяются локальные операторы, работающие в сравнительно небольшом окне, которое накладывается на область, окружающую рассматриваемый элемент изображения. Так производится усреднение яркости по окну размером 4×4 и сравнение средней яркости в данной точке (i, j) со средней яркостью в точках, расположенных на расстоянии четырех шагов от (i, j) . Если средняя яркость в данной точке больше, чем в двух диаметрально противоположных относительно нее точках (по любому из рассматриваемых направлений), то (i, j) относится к объекту.

Вычисляются величины

$$D(i, j) = 0,5 [G(i, j) - G(i-1, j) + G(i, j) - G(i+1, j)] \quad (3.26)$$

и $\bar{G}(i, j)$ – среднее значение яркости на некотором окне. Бинаризация проводится по формуле

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } G(i, j) > \bar{G}(i, j) - D(i, j), \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.27)$$

Выбирая локальные пороги для изображений, разбитых (тем или иным способом) на блоки (например, участки с двумя четко выраженными пиками гистограммы яркости), можно далее провести их пространственную интерполяцию, что дает переменный (динамический) порог для поля зрения в целом. Введение зависимости порога от координат элементов позволяет использовать такие понятия, как близость точек, обладающих данным порогом, для отделения объектов от фона.

Квантование на несколько градаций яркости чаще всего проводят с равномерным шагом между последовательными порогами, для выбора диапазона изменения которых можно воспользоваться вышеописанными методами. Но возможно и неравномерное квантова-

ние, применяемое в тех случаях, когда различные уровни яркости на изображении неравновероятны: больший шаг соответствует реже встречающимся уровням. Такой алгоритм делает равномерной гистограмму дискретных значений яркости, увеличивая контрастность изображения.

3.2.3. Предварительная обработка изображений

Основная цель предварительной обработки изображений – удаление шумов (сглаживание, фильтрация), улучшение контрастности (преобразование шкалы яркости, обострение), а также коррекция искажений изображений и т.д.

С целью коррекции известных геометрических искажений введенных изображений, вызванных, например, пространственной нелинейностью датчика информации, неперпендикулярностью рабочей плоскости к оптической оси камеры, применяют двумерные геометрические преобразования вида $x' = \xi(x, y), y' = \eta(x, y)$. При этом необходимо учитывать, что в случае дискретного представления изображения точки (x', y') не попадают в узлы сетки. Если просто произвести округление, заменив (x', y') на координаты (i', j') ближайшего угла сетки, то указанное преобразование теряет однозначность, так как для некоторых точек изображения уровень яркости вообще не будет определен, а другим точкам может быть приписано несколько уровней. Во избежание этой трудности приходится пользоваться преобразованием, обратным применяемому $x = \bar{\xi}(x', y'), y = \bar{\eta}(x', y')$, которое задает положение каждой точки нового изображения на плоскости исходного. Теперь по уровням яркости $G(i, j)$ узловых элементов исходного изображения с помощью любого интерполяционного метода (ближайшего «соседа», билинейных или бикубических сплайнов и др.) можно найти яркость именно тех промежуточных точек плоскости (x, y) , которые соответствуют искомым узлам нового изображения. В робототехнической практике применяется простой способ коррекции уровней яркости для устранения различных систематических искажений изображе-

ния, вводимого в ЭВМ с видеосенсора, основанный на следующей процедуре:

а) воспринимаемую функцию $G(i, j)$ представляют в виде произведения $F(i, j)\varepsilon(i, j)$, где $F(i, j)$ – «истинное» изображение, а $\varepsilon(i, j)$ – функция искажений;

б) по калибровочному изображению, полученному от строго однотонной сцены, определяют функцию $\varepsilon(i, j)$;

в) получают $F(i, j)$ из $G(i, j)$, поточечно удаляя влияние искажений $\varepsilon(i, j)$.

С помощью подбираемого преобразования шкалы яркости вида $G' = \varphi(G)$ можно повысить контрастность изображения в желаемом диапазоне яркости. Для повышения контрастности используется также алгоритм, реализующий математическую модель известного из физиологии эффекта «латерального торможения», когда яркость данного элемента изображения делается зависимой от пространственного распределения яркости по совокупности соседних элементов. Благодаря этому эффекту сигнал от элемента, расположенного в непосредственной близости от границы между объектом и фоном, либо «тормозится», либо относительно усиливается в зависимости от того, находится ли элемент в более или менее светлой области. При предварительной обработке изображения путем операции усреднения амплитуду шума с нулевым средним значением можно уменьшить, усредняя независимо полученные изображения одной и той же сцены. Если идеальное изображение составлено из блоков с более или менее постоянным уровнем яркости, можно уменьшить шум внутри таких блоков за счет локального усреднения яркости каждого элемента по его соседям в окне размером $a \times b$:

$$G(i, j) = \frac{1}{(2a+1)(2b+1)} \sum_{m=-b}^b \sum_{n=-a}^a G(i+m, j+n). \quad (3.28)$$

К сожалению, такая операция качественно имеет много общего с расфокусировкой, т.е. устраняя шумы, она теряет мелкие детали и размывает четкие границы изображений объектов. Во избежание

этого явления пользуются выборочными усреднениями, например, с помощью одного из следующих приемов:

а) вначале проверяют, принадлежит ли данный элемент изображения границе между фоном и объектом, усреднение ведется лишь по точкам границы либо по соседним элементам, расположенным с той же стороны от границы, что и данный элемент;

б) при усреднении учитываются только те соседние элементы, которые незначительно отличаются по уровню яркости от данного элемента;

в) среди элементов, расположенных рядом, по разные стороны от него выбирается подмножество, обладающее наименьшим разбросом значений яркости, и усреднение проводится по этому подмножеству (отобрав соседние элементы по методам «а» и «б», можно при усреднении не отбрасывать остальные соседние элементы, а просто приписывать им меньшие веса, причем этот процесс может быть проведен итеративно);

г) сглаживание производится заменой яркости данного элемента не средним, а медианным значением яркости соседних элементов, т.е. все элементы в выбранном окне $a \times b$ упорядочиваются согласно значениям их яркости в неубывающую последовательность $G_1, G_2, \dots, G_{ab-1}, G_{ab}$, и медианное значение G_m соответствует номеру $m = \lceil (ab + 1) / 2 \rceil$. Этот алгоритм удаляет из изображения такие структуры, площадь которых внутри окна не превышает $\lceil (\sqrt{ab} - 1) / 2 \rceil$ элементов, не размывая при этом границ.

Как уже указывалось, влияние шумов телевизионных датчиков СТЗ на положение границ объектов минимизируют методами классической пространственной фильтрации, а также методами пространственной регуляризации, когда значение интенсивности в одной точке заменяется интенсивностью, усредненной по окрестности соседних точек. Таким способом достигается эффект сглаживания, т.е. подавления резких перепадов и выбросов, вызванных шумами. Получение оценки в одной точке при учете влияния ряда окрестных по методу среднеквадратического имеет неоспоримые преимущества перед известными методами. Это объясняется тем, что оценка случайной величины по методу наименьших квадратов (МНК) обладает следующими свойствами: несмещенностью, состоятельностью, имеет минимальную дисперсию в классе всех несмещенных линейных оценок, является оценкой максималь-

ного правдоподобия, имеет нормальное распределение, является достаточной для случайной величины и ее дисперсии. Несмотря на столь значительные достоинства, МНК не находит применения в практике цифровой фильтрации сигналов в силу громоздкости вычислений и, как следствие, низкой скорости обработки изображений. Ниже приводятся расчетные соотношения для вычисления коэффициентов степенных полиномов для МНК, оптимизированных по минимуму вычислительных затрат.

Пусть приближающая функция представлена степенным полиномом второй–пятой степеней:

$$P_x = A_0 + A_1x_K + A_K^2 + A_3x_K^3 + A_4x_K^4 + A_5x_K^5, \quad (3.29)$$

где $x_K = 2(K+1)/(N-1) - 1$ – относительная координата узла, $A_0 - A_5$ – коэффициенты полинома, K – порядковый номер узла, N – число узлов.

Расчетные соотношения для вычисления коэффициентов сведены в табл. 3.1, в которой через F_K обозначены узловые значения исходной функции. В обозначения коэффициентов полиномов ниже пятой степени введены дополнительные индексы, указывающие степень полинома. Оценка эффективности предложенной методики вычисления коэффициентов приведена в табл. 3.2. Она дается в виде отношения общего количества операций (числа умножений и сложений), затрачиваемых на вычисление всех коэффициентов по методу Крамера (методу определителей) и методу Гаусса (методу единственного деления), к числу операций по проводимой методике (приводится в строке «выигрыш общий»).

Приведенные соотношения положены в основу двух методик фильтрации сигналов телевизионных датчиков по МНК. Первая методика низкочастотной пространственной фильтрации сводится к следующему. Выбирается фильтрующее окно с нечетным числом элементов (число элементов в окне должно превышать степень выбранного полинома), центральным элементом которого является обрабатываемая точка (или интенсивность в которой уточняется) с относительной координатой $x_C = 0$. Вычисляется коэффициент A_0 , причем его значение является интенсивностью этой точки: $\hat{P}_{x_C} = A_0$. Окно сдвигается на один элемент по полю изображения, и вычисления повторяются.

Таблица 3.1

Расчетные соотношения для вычисления коэффициентов полиномов

Полином пятой степени – $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$	
$A_0 = (y_0 z_1 + y_2 z_2 + y_4 z_3) / B_1$	$z_1 = \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix}$
$A_1 = (y_1 z_4 + y_3 z_5 + y_5 z_1) / B_2$	$z_2 = \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix}$
$A_2 = (y_0 z_2 + y_2 z_6 + y_4 z_9) / B_1$	$z_3 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix}$
$A_3 = (y_1 z_5 + y_3 z_7 + y_5 z_2) / B_2$	$z_4 = \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix}$
$A_4 = (y_0 z_3 + y_2 z_9 + y_4 z_9) / B_1$	$z_5 = \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix}$
$A_5 = (y_1 z_1 + y_3 z_3 + y_5 z_3) / B_2$	$z_6 = \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^8 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix}$
$B_1 = \begin{bmatrix} x^0 \\ \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} z_2 + \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} z_3$	$z_7 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix}$
$B_2 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} z_4 + \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} z_5 + \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} z_1$	$z_8 = \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix}$
$Y_m = \sum_{K=1}^N F_K \times_K^m, \begin{bmatrix} x^m \\ \end{bmatrix} = \sum_{K=1}^N \times_K^m$	$z_9 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{10} \\ \end{bmatrix}$
Полином четвертой степени – $A_{04}, A_{14}, A_{24}, A_{34}, A_{44}$	
$A_{04} = A_0, A_{24} = A_2, A_{44} = A_4$	$A_{14} = \left((y_1 - y_5) \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - y_3 \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \right) / B_2$
$A_{34} = \left((y_3 - y_5) \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} - y_1 \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \right) / B_2$	$B_2 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix}$
Полином третьей степени – $A_{03}, A_{13}, A_{23}, A_{33}$	
$A_{03} = \left(y_0 \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} - y_2 \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \right) / B_1$	$A_{13} = \left(y_1 \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - y_3 \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \right) / B_2$
$A_{23} = \left(-y_0 \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} + y_2 \begin{bmatrix} x^0 \\ \end{bmatrix} \right) / B_1$	$A_{33} = \left(-y_1 \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} - y_3 \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \right) / B_2$
$B_1 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix}$	$B_2 = \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^6 \\ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^4 \\ \end{bmatrix}$
Полином второй степени – A_{02}, A_{12}, A_{22}	
$A_{02} = A_{03}, A_{22} = A_{23}$	$A_{12} = y_1 / \begin{bmatrix} x^2 \\ \end{bmatrix}$

Таблица 3.2

Сравнительная оценка вычислительных затрат

Степень полинома	5	4	3	2	
Число операций по Крамеру	7560	1080	180	36	
Выигрыш к Крамеру	общий	103	25	8	3
	при фильтрации	444	63	25	5
Число операций по Гауссу	254	160	92	46	
Выигрыш к Гауссу	общий	3,5	3,8	4,1	3,8
	при фильтрации	14,9	9,4	13,1	6,5

Выигрыш в вычислительных затратах приведен в табл. 3.2 и равняется 6,5–14,9 раза. Вычислительные затраты настолько уменьшились, что МНК по этому показателю стал близок к таким простейшим методам фильтрации, как медианная и скользящее среднее.

Второй вариант фильтрации связан с учетом фона, яркости чувствительности ТД. При этом выбирается окно больших размеров, например, 3×256 , т.е. три строки по 256 элементов в каждой. Определяются все коэффициенты полинома и по ним вычисляются интенсивности элементов только центральной строчки. За счет большой площади фильтрующей апертуры мелкие детали сглаживаются, остается только фоновая составляющая. Оценки интенсивности можно использовать для получения межкадровой разности (например, для повышения контраста уменьшения нелинейности чувствительности телевизионных датчиков и т.д.).

Моделирование, проведенное на ЭВМ, показало, что при фильтрации эталонных изображений среднеквадратическое значение погрешности положения границы снижается почти на 40 %. Высокая устойчивость вычислительного процесса сохраняется даже при использовании микроЭВМ с короткой разрядной сеткой.

Для пространственной фильтрации изображений, которая представляет собой обобщение однородных методов фильтрации сигналов на двумерный случай, в СТЗ продолжают использовать преобразование Фурье, так как оно основано на хорошо исследованном теоретическом аппарате и позволяет применять развитые методы и средства как цифровой (например, быстрое преобразование Фурье), так и аналоговой (в частности, оптической) реализаций.

В практическом применении СТЗ иногда необходимо обеспечить фильтрацию высокочастотных составляющих пространствен-

ного спектра, описывающего изображение. Для синтеза фильтра, подавляющего высокочастотные составляющие пространственного спектра, можно воспользоваться, например, функциями типа

$$H(l, m) = [\cos(\pi l) \cos(\pi m)]^V, \quad (3.30)$$

где V – целое положительное число, или

$$H(l, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } l \leq L, m \leq M, \\ 0 & \text{при } l > L, m > M; \end{cases} \quad (3.31)$$

где L, M – положительные постоянные. Однако такие фильтры наряду с отсеиванием высокочастотных шумов размывают границы изображений, что, как правило, дает преимущества фильтрам, основанным на специально подобранных локальных операторах.

В робототехнических СТЗ широко применяются методы логического сглаживания (особенно в случае бинарных изображений). При фильтрации бинарных изображений с помощью оператора Лапласа (вернее, его дискретной модификации)

$$L(i, j) = G(i-1, j) + G(i, j-1) + G(i, j+1) + G(i+1, j) - 4G(i, j) \quad (3.32)$$

назначаются положительный $T_P > 0$ и отрицательный $T_{\Pi} < 0$ пороги и используется следующая логика: если $T_{\Pi} < L(i, j < T_P)$, то $G(i, j)$ не изменяется, при $L < T_P$ в точке (i, j) «0» заменяется на «1», при $L < T_{\Pi}$ «1» заменяется на «0».

Еще чаще производят попеременное сжатие и расширение областей, т.е. заменяют каждую «1» на «0», если среди «соседей» рассматриваемого элемента на данном шаге есть хотя бы один нулевой элемент, после чего обращают этот процесс. Это позволяет удалить небольшие или тонкие шумовые образы, имеющие значение яркости «1». Для удаления небольших шумовых структур с нулевыми значениями яркости меняется порядок сжатия и расширения областей. Обобщение этого метода на случай многоградационных изображе-

ний носит название минимально-максимальной фильтрации: рассматриваемому элементу попеременно присваивают значения локальных минимума и максимума яркости в выбранном окне (при максимально-минимальной фильтрации – наоборот).

Существует много других логических операторов удаления шума на изображении. Так, при фильтрации бинарных изображений «0» заменяется на «1» в том и только том случае, если все соседние элементы суть «1», а элементы «1» заменяются на «0», если все соседние элементы суть «0» или среди восьми «соседей» имеется единственный элемент с единичной яркостью, причем он располагается по диагонали от данного.

Общая идея устранения размытости изображения с целью обострения границ однородных областей основана на повышении вклада высоких частот пространственного спектра. Если функция размытости $R(i, j)$ задана, то для получения скорректированного изображения $\tilde{G}(i, j)$ можно воспользоваться формулой, основанной на прямом и обратном преобразованиях Фурье: $\tilde{G} = F^{-1}\{F(G)/F(R)\}$. Однако на практике $R(i, j)$ редко бывает известна, а классические методы фильтрации, основанные на знании математического описания помех, следует применять с большой осторожностью, так как на высоких частотах не всегда можно быть уверенным в преобладании полезного сигнала над шумами, модель которых построить трудно. Здесь могут быть полезны рассмотренные примеры подавления шумов, а также алгоритм типа следующего.

Если $\bar{G}(i, j)$ – функция, полученная с помощью локального усреднения яркости по некоторому окну, размывающего изображения, то, добавляя к исходной яркости $\bar{G}(i, j)$ разность $G(i, j) - \bar{G}(i, j)$ (она соответствует значению дискретного оператора Лапласа), можно в первом приближении устранить влияние такой размытости.

Низкие пространственные частоты исходного изображения G сохранены в \tilde{G} достаточно точно, тогда как высокие подавлены, поэтому в разности $G - \tilde{G}$ низкие частоты удалены, и, следовательно

но, в выражении $G + (G - \bar{G})$ низкие частоты остаются без искажения, а роль высоких усиливается.

3.2.4. Сегментация изображений

Сегментацией называют процесс разбиения изображения сцены на составные части: объекты, их фрагменты или характерные особенности. За последнее время было предложено множество алгоритмов сегментации [1, 2]. Наиболее распространенные методы сегментации базируются на выявлении одного из двух основных свойств изображения – различия и сходства. В соответствии с этим рассмотрим кратко два основных подхода к сегментации: выделение контуров (контурных линий) и нахождение однородных областей.

Выделение контуров. Контур – это совокупность видимых на плоском изображении рабочей сцены границ между объектами и фоном, между различными объектами или между сменными поверхностями одного и того же объекта. Контурные точки должны характеризоваться некоторым перепадом яркости между областями, лежащими по разные стороны границы.

Самый простой способ нахождения границ, который используется в СТЗ роботов, работающих с очень контрастными изображениями (например, при подсветке деталей снизу или сзади), заключается в непосредственном прослеживании точек такого перепада, обнаруженных при бинаризации изображения. Более традиционный путь выделения контурных линий основан на определении меры изменения яркости (той или иной оценки поля градиентов) с последующим применением операций сравнения с порогом. При этом можно воспользоваться обычными методами численного дифференцирования функций двух переменных на целочисленной решетке, особенно, если предварительно были реализованы рассмотренные в предыдущем разделе алгоритмы удаления шумов, повышения контрастности и обострения границ.

С целью повышения помехоустойчивости при выделении контуров были предложены специальные операторы, сочетающие в себе сглаживание и дифференцирование функций $\bar{G}(i, j)$. Классическим примером служит оператор Хюккеля, выделяющий на

изображении прямолинейные отрезки линии перепада яркости и определяющий их направление. Идея этого алгоритма состоит в том, что яркость в прямоугольном окне, аппроксимируемом кругом, представляется ступенчатой функцией, описываемой с помощью трех параметров: значениями яркости по обе стороны от искомого участка контура, пересекающего круг, удаленностью этого отрезка от центра круга и его наклоном. Для определения отрезка контура указанные параметры находятся методом наименьших квадратов с использованием разложения функции яркости на рассматриваемой круговой области по специальной системе базисных функций. Если среднеквадратическое отклонение при найденных параметрах не превышает предварительно заданного порога, полученный отрезок относится к контуру. Оператор Хьюккеля малочувствителен к шумам и обладает рядом других преимуществ, однако его реализация требует свыше 20 арифметических операций на один элемент изображения, что приводит к значительным затратам машинного времени и делает неоправданным его практическое использование в СТЗ роботов.

В робототехнике чаще используются менее общие, но более простые алгоритмы выделения контура, основанные не столько на расчетах, сколько на логических процедурах. Оценив величину градиента в узлах решетки, проще всего считать (i, j) принадлежащей контуру, если $|\nabla G(i, j)|$ превышает постоянный порог τ . Однако из соображений помехоустойчивости рациональнее использовать (как при оценке степени изменения яркости, так и при назначении порога) более практичные локальные алгоритмы.

Для оценок градиента иногда выгоднее брать не разности яркостей, а разности между их (взвешенными) средними значениями, что позволяет сглаживать отсчеты вдоль границы, в то же время «дифференцируя» яркость поперек границы. В алгоритмах «направленного дифференцирования» применяют фильтрацию $|\nabla G| \sim G \cdot k$ со специально подобранными матрицами для разных направлений. Можно сразу произвести свертку маски, подчеркивающей контур, с передаточной функцией фильтра нижних частот, что позволит подключить усиленные при обострении высокочастотные пространственные компоненты шума.

Для оценки модуля градиента до операции сравнения с порогом кроме введенных выше сравнительно простых операторов Робертса в СТЗ начинают применяться и другие операторы, использующие нелинейные комбинации значений яркости изображения. Обозначим для компактности уровни яркости восьми соседних элементов точки (i, j) следующим образом:

$$\begin{aligned} A_0 & A_1 & A_2, \\ A_7 & G(i, j) & A_3, \\ A_6 & A_5 & A_4. \end{aligned} \quad (3.33)$$

В этих изображениях можно описать известные нелинейные локальные операторы:

а) оператор Собела $|\nabla G(i, j)| \sim \sqrt{X^2 + Y^2}$,

б) оператор Кирша $\left| \nabla^5 G(i, j) \right| \sim \max \{1, \max |5S_i - 3Q_i|\}$,

где $S_i = A_i + A_{i\oplus 1} + A_{i\oplus 2}$, $Q_i = A_{i\oplus 3} + A_{i\oplus 4} + A_{i\oplus 5} + A_{i\oplus 6} + A_{i\oplus 7}$,
здесь \oplus обозначает суммирование по модулю 8;

в) оператор Уоллиса $|\nabla G(i, j)| \sim \frac{1}{4} \log \left[\frac{|G(i, j)|}{A_1 A_3 A_5 A_7} \right]$,

где мерой величины градиента служит разность между логарифмом яркости в данной точке и средним значением логарифмов яркостей четырех ближайших «соседей» (этот способ малочувствителен к мультипликативным помехам);

г) оператор Розенфельда

$$|\nabla G(i, j)| \sim D_1(i, j) D_2(i, j) \dots D_m(i, j),$$

где

$$D_m = (i, j) = (1/n) [G(i+n-1, j) + G(i+n-2, j) + \dots G(i, j) - G(i-1, j) - G(i-2, j) - \dots - G(i-n, j)], n=1, 2, \dots, M, \text{ а } M = 2^m,$$

m – целые (этот способ, позволяющий точно локализовать контурную линию, малочувствителен к шумам).

Для порогового ограничения для выделения подчеркнутыми вышеописанными операторами контурных линий был предложен ряд алгоритмов. Нелинейная процедура «подавления доминирующими соседями» имеет целью выделение больших отчетливых перепадов яркости из окружения более слабых и состоит в сканировании поля модулей градиентов малым окном: значение $|\nabla G(i, j)|$ в центре окна обнуляется, если оно оказалось не наибольшим в этом окне, после чего выполняется обычное сравнение с порогом. В модифицированном варианте этой процедуры «подавление» центрального элемента происходит при наличии в окне точек с градиентом, значительно превосходящим по модулю $|\nabla G(i, j)|$.

Еще один алгоритм получения границ состоит в учете не только модуля вектора градиента, но и его направления $\theta(i, j)$ – оценки угла $\arctg[(\partial g / \partial y) / (\partial g / \partial x)]$. Если (i_m, j_m) – точка, смещенная от (i, j) на m узлов в направлении $\theta(i, j)$, то выявление контурной точки производится согласно следующим неравенствам:

- 1) $|\nabla G(i, j)| > \tau$,
- 2) $|\theta(i_m, j_m) - \theta(i, j)| > \Theta \vee |\nabla G(i_m, j_m)| < a |\nabla G(i, j)| + b$,
- 3) $|\nabla G(i, j)| - |G(i_m, j_m)| < |G(i_l, j_l)| - |\nabla G(i, j)|$,

где $-M \leq m \leq M$, $-M \leq l \leq M$, M, τ, Θ, a, b – константы.

Если неравенство 2 справедливо при двух значениях $m = m_1$ и $m = m_2$, причем m_1 и m_2 противоположны по знаку, то точка (i, j) считается контурной, разумеется, при выполнении условия 1.

Если же 2 удовлетворяется только для одного значения m , то проверяется неравенство 3 в такой точке (i, j) , что $ml < 0$. Если оно справедливо, то точка (i, j) контурной не считается. Этот алгоритм обеспечивает выделение не только прямолинейных, но и криволинейных контуров, однако он сложен в реализации, особенно в случае обработки матриц отсчетов яркости $G(i, j)$ большого размера. Отметим, что необходимость перерабатывать данные обо всем массиве элементов изображения резко затрудняет практическое применение многих перечисленных выше методов сегментации.

В [1, 2] был предложен эффективный вычислительный алгоритм выделения контура, в котором объем перерабатываемой информации существенно снижается за счет обработки данных об изображении «порциями» в виде грубых матриц отсчетов яркости. Этот алгоритм реализует идею использования целенаправленных «перемещений» датчика информации относительно объекта в зависимости от текущих результатов обработки изображения.

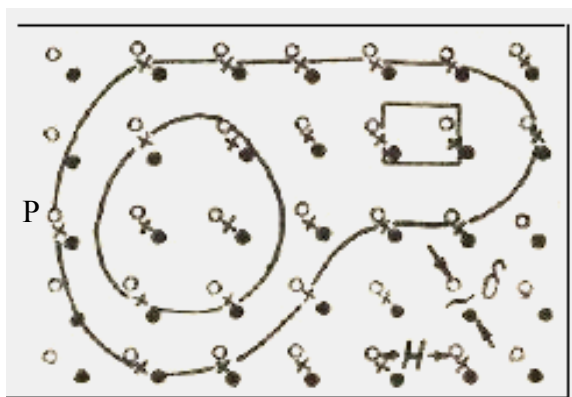


Рис. 3.15. Определение контура изображения объекта: ○ – положение отсчетов до «сдвига»; • – положение отсчетов после «сдвига»; × – «машинная» контурная точка

При реализации этого алгоритма контурные точки локализируются с погрешностью δ , определяемой величиной сдвига и заведомо меньшей шага H грубой матрицы (рис. 3.15). Практически такие сдвиги можно реализовать несколькими способами, наиболее перспективным из которых представляется аппаратное управление син-

хронизацией считывания видеосигнала телекамеры по отношению к развертке.

В робототехнических задачах для сокращения вычислительных затрат при сохранении необходимой точности используются алгоритмы, сокращающие полный объем N^2 отсчетов яркости изображения. Можно сказать, что общее число отсчетов снижается до величины порядка $N = \sqrt{N}$. В памяти одновременно хранятся лишь две бинарные матрицы размером $n \times n$ и контурный массив. На каждом шаге выбирается такой сдвиг, который имеет направление на наибольший «разрыв» между уже выделенными контурными точками.

Существует класс алгоритмов последовательной сегментации, в которых активно используется как текущая, так и априорная информация о виде контурных линий. Примером последовательной сегментации может служить отслеживание краев объектов на основе априорной информации о начальной (очередной) точке контура, его возможной форме или направлении в окрестности данной точки. Во избежание тупиковых ситуаций при прослеживании необходимо допускать возврат в уже пройденные точки. Для простых изображений предложены «гетероархические» программы, в которых на основе данных о выделенных элементах контура делается прогноз о типе и месте новых элементов.

С целью выделения «оптимальных» (по выбору критерия качества контура) кривых могут быть использованы методы математического программирования, но по соображениям быстройдействия чаще применяются эвристические алгоритмы – продолжение прямолинейного отрезка контура, круговой поиск и др.

На практике при прослеживании контуров возникают определенные сложности, связанные с разрывами, потерями отдельных частей контуров, ошибочным представлением положения контурных элементов. Из-за этого приходится применять дополнительную обработку контурного графического препарата, учитывающую локальные, региональные и глобальные критерии соединения линий. Алгоритмы такой обработки чрезвычайно сильно зависят от конкретных задач.

Операции на однородных областях. При сегментации изображений на ряд максимально однородных (например, по уровню ярко-

сти) областей наиболее прост метод наращивания или объединения их: соседние элементы с близкими значениями яркости группируются вместе и объединяются в области согласно степени их связности. Однако на практике для получения приемлемых результатов в процессе наращивания областей приходится учитывать ряд ограничивающих факторов. Первая трудность, касающаяся самого определения понятия связности дискретизированных изображений, видна из рис. 3.16. На рис. 3.16, *а* имеются три области (внутренняя белая часть кольца, черное кольцо и внешняя белая область), соответствующие интуитивным представлениям и всем принятым определениям связности.

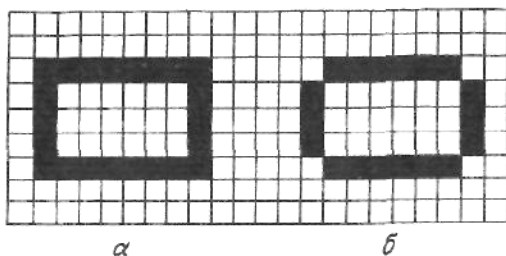


Рис. 3.16. Определение связности элементов изображения

Однако при рассмотрении рис. 3.16, *б* возникает неоднозначность: черные элементы составляют кольцо (если считать «соседями» данного элемента все 8 элементов, касающихся его), или они представляют собой 4 разрозненных отрезка (если исключать 4 диагональных элемента из числа «соседей»).

Парадокс состоит в том, что приняв первое определение связности (восьмисвязность), мы вынуждены считать и белые элементы внутри «единого кольца» связанными с внешней белой областью. Для преодоления подобных противоречий в общем случае можно условно пользоваться принципом восьмисвязности при объединении элементов в области, однородные по некоторому свойству 5, и принципом четырехсвязности для областей, обладающих противоположными свойствами 5.

Для наращивания областей были предложены двухэтажные процедуры. Сначала исходное изображение разбивается на элементар-

ные области, где пары элементов объединяются, если они обладают одинаковой яркостью и являются четырехсвязными. Далее применяются различные эвристические правила слияния (наращивания) элементарных областей, имеющих общие границы.

Кроме наращивания областей, можно пользоваться обратной операцией сжатия для поиска достаточно больших однородных участков изображения, трактуемых как вероятные места захвата деталей роботом. Сжатие однородной области на бинарном изображении выполнялось по шагам путем удаления всех элементов, среди «соседей» которых есть элемент фона.

Идея сжатия используется также в процедурах утоньшения и построения остова областей изображения. Операцию утоньшения чаще всего применяют для получения более четких линий при построении графических препаратов изображений с размытыми границами областей. Она может состоять из циклов по 4 шага, на каждом из которых поочередно удаляют левые (соответственно правые, верхние и нижние) граничные элементы объекта, т.е. элементы, не обладающие четырехсвязностью по крайней мере с одним ближайшим «соседом». Граничные элементы не удаляют в двух случаях: а) если их удаление ведет к нарушению восьмисвязности, б) если они являются точками «дуги», т.е., самое большее, обладают четырехсвязностью только со своими верхним и нижним (или только с правым и левым) «соседями».

При сегментации изображений бывает полезно представление объектов сцены в виде их остовов – геометрических мест точек, минимум расстояния от которых до границы однородной области достигается не для одной, а для большего числа точек границы. С этой целью используется преобразование к срединным осям. Хотя такое преобразование чувствительно к шумам, его идея была на практике реализована в виде алгоритма «фронтов столкновения» для выделения длинных параллельных кромок деталей, за которые ее может захватить робот.

В заключение напомним, что сегментацию изображений можно производить не только по яркости областей, но и по иным признакам – цветовым, текстурным, по характеристикам формы и т.д.

3.2.5. Описание изображений

Этот этап представляет собой преобразование изображения в совокупность его количественных (числовых) и (или) качественных (логических, вербальных) характеристик [1, 2]. Говоря об СТЗ роботов, под описанием изображений в первую очередь понимают получение набора признаков для распознавания (классификации) объектов на изображении, определение их размеров и параметров, задающих положение и ориентацию объектов.

Одним из подэтапов описания изображения является операция кодирования (сжатия) изображения. Рассмотрим несколько наиболее употребительных в робототехнике алгоритмов кодирования зрительной информации путем образования кодов, которые, используя статистические свойства изображений, в среднем более компактны, чем исходное представление, но позволяют тем не менее точно восстановить оригинал. Статистические методы кодирования основаны на том, что если уровни яркости изображения неравновероятны, то затраты памяти можно снизить, используя короткие коды для часто встречающихся уровней и длинные для редких. Можно учесть и имеющуюся на изображениях высокую степень корреляции между соседними элементами, например, представить яркость последовательных элементов строки развертки в разностном виде:

$$G_1, G_2 - G_1, G_3 - G_2 \dots C_x, C - C^{\wedge}, C_3 - C_2 \dots$$

Так как малые разности появляются значительно чаще больших, то удастся добиться существенного сжатия информации, представив их короткими кодами. Основным недостатком подобных методов является накопление ошибок, что вынуждает несколько раз на строке «привязываться» к истинному значению яркости.

Простой метод, применяемый в СТЗ роботов, – это кодирование длин серий (однородных отрезков строки развертки, на которых уровни яркости элементов одинаковы или близки). Для каждой серии задаются ее значение яркости (или перепад по отношению к предыдущей серии) и длина. По имеющимся сообщениям коэффициент сокращения объема данных при использовании одновременного кодирования длин серий для бинарного изображения достигает

5. Обобщение метода на две пространственные переменные доводят коэффициент до 10.

Для сжатого представления контуров (выделенных границ объектов или линий уровня функции яркости) эффективно используются цепные коды, удобные для дальнейших процедур сжатия изображений. На рис. 3.17 приведен пример цепного кода контурной линии, каждая позиция которого указывает в соответствии с приведенными обозначениями возможные направления перехода к соседнему элементу при прослеживании линии.

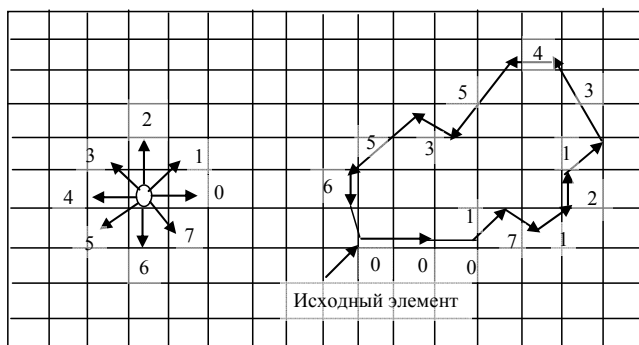


Рис. 3.17. Пример цепного кода 0001712133455356

Известны и другие методы кодирования изображений, используемые в СТЗ, например, применение кодирования методом секущих контура или построение годографа. Эффективность этих методов заключается в простоте реализации и надежности работы.

Суть метода секущих контура заключается в следующем. Сначала формируется реализация $\beta'(n)$, соответствующая развертке контура изображения ОМ. Особенности построения этой реализации видны из рис. 3.18. Функция $\beta'(n)$ строится за два обхода изображения контура ОМ. Во время формирования датчиком информации при подходе считывающего луча (ячейки) к краю изображения объекта (рис. 3.18, а) выбирается любая точка (например, точка 1), которая принимается за исходное (нулевое) положение. Устанавливается число n элементов разложения контуров изображения ОМ, определяемое разрешающей

способностью ДОИ. Затем строятся прямые линии (секущие контура), характеризующиеся угловым коэффициентом:

$$K = \frac{y_n + y_{n+m}}{x_n - x_{n+m}}, \quad (3.34)$$

где $x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m}$ – координаты точек контура в прямоугольной системе координат, связанной с плоскостью накопителя ТИ; m – постоянное число элементов (дискретов) разложения контура, соответствующее выбранной длине секущей контура.

Углы между предыдущей и последующей прямыми

$$\beta_i = \arctg \frac{k_T - k_{\text{пр}}}{1 + k_{\text{пр}} k_T}, \quad (3.35)$$

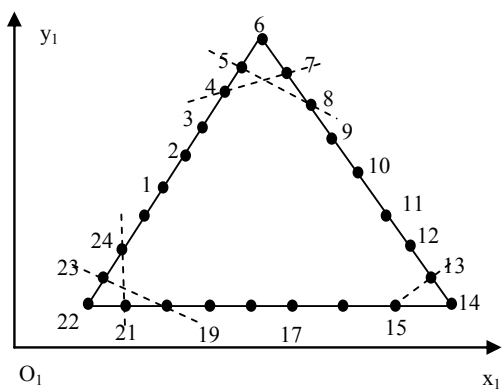
где $k_T, k_{\text{пр}}$ – коэффициенты, соответствующие угловым коэффициентам предыдущей и текущей прямых. Производится накопление следующих сумм:

$$\beta_n = \sum_{i=1}^n \beta_i. \quad (3.36)$$

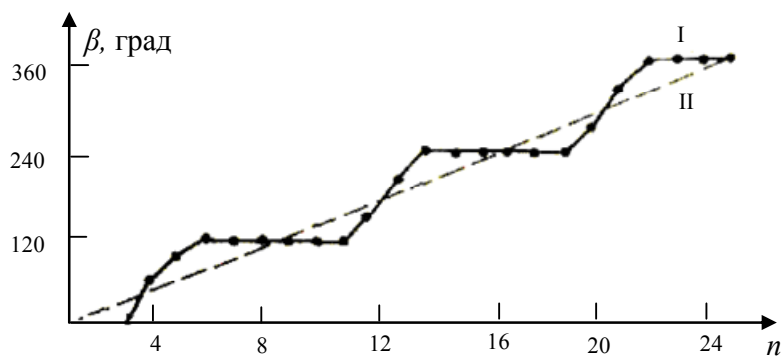
В результате формируется специфичная одномерная развертка контура изображения ОМ (рис. 3.18, б), представляющая собой сумму линейно возрастающей функции и функции, характеризующей отклонение данной развертки изображения ОМ от развертки изображения круга (кривая I).

Во время второго обхода контура вычисляется линейно возрастающая функция (кривая II, см. рис. 3.18, б).

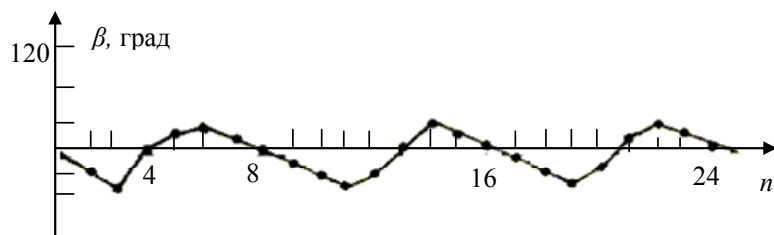
$$K_{(n)} = k_i + M, M = \frac{360^\circ}{n}, i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (3.37)$$



а



б



в

Рис. 3.18. Пример кодирования изображения методом секущих контура

где k_i определяется из условия, что

$$k_{i=0} = 0, \text{ а } k_{i=1} = M, k_{i=2} = M + M, \dots \quad (3.38)$$

Функция $\beta(n)$ (рис. 3.18, в) является информативной частью полученной одномерной реализации, а функция $K(n)$ – неинформативной частью, которая удаляется путем соответствующего вычитания:

$$\beta'(n) = \beta(n) - K(n). \quad (3.39)$$

Задача построения годографа (рис. 3.19) обычно рассматривается для бинарных изображений плоских объектов, когда исходной информацией может служить как растровое изображение объекта, так и его представление в виде массива импульсных кодов.

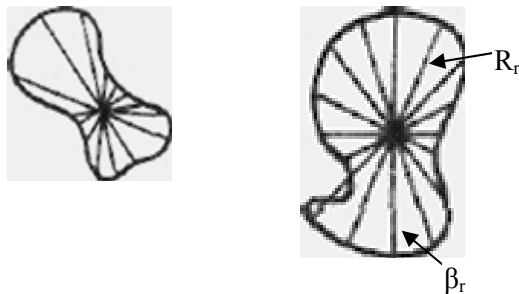


Рис. 3.19. Годограф

В случае растрового изображения построение выполняется в процессе обхода связной области вдоль контура по следующему алгоритму:

1. Вычисление длины радиуса-вектора R_r и его углового положения β_r по заданным координатам центра тяжести области и произвольной точки на контуре.

2. Поиск на изображении следующей контурной точки.

3. Проверка на совпадение найденной контурной точки с точкой начала обхода и окончания алгоритма при фиксации совпадения.

4. Вычисление угла между текущим и последним занесенным в память положением радиуса-вектора.

5. Сравнение полученной величины угла с заданной дискретностью фиксации значений радиуса-вектора.

6. Вычисление значения радиуса-вектора при равенстве либо повышении заданной величины угла.

7. Возврат к пункту 2.

8. Конец.

Результат построения годографа приведен на рис. 3.20. Следует отметить, что по сопоставлению текущего и эталонного годографов можно определить ориентацию объекта. Сравнивая полученную реализацию с текущей, можно получить информацию о линейных координатах и ориентации объекта, например, по корреляционной функции легко находятся искомые параметры.



Рис. 3.20. Результат построения годографа

Вычисление признаков объекта. Изображениям объектов на этапе обработки ставится в соответствие совокупность классифицирующих признаков, которые в большинстве робототехнических задач должны быть инвариантны к местоположению и ориентации объектов на рабочей сцене. Кроме яркости, цвета, текстуры видимых поверхностей наиболее распространены признаки, характеризующие форму изображений объектов. Множество алгоритмов расчета признаков формы можно разделить в соответствии с тем, используются ли в них глобальные свойства областей изображения, соответствующие объектам, или характеристики контурных линий, ограничивающих эти области, или их фрагменты.

Возможен и другой принцип разделения алгоритмов, согласно которому они разбиваются на две основные группы. Первая базируется на формальных процедурах вычисления классифицирующих признаков в соответствии с заданными математическими преобразованиями (коэффициенты полиномиальных представлений, спектральных разложений, интегральные варианты, топологические показатели и др.). Вторая группа основана на так называемом «лингвистическом» подходе к классификации объектов, когда признаки задаются (на основании предшествующего изучения человеком конкретных классов объектов) в виде отдельных фрагментов и способов их соединений или взаимного расположения характерных элементов. В серийных СТЗ промышленных роботов наиболее распространены алгоритмы, называемые «геометрическими признаками», объединяющие обе данные группы алгоритмов.

Далее опишем процедуру расчета геометрических признаков для работы с трехмерными объектами, аппроксимируемыми не только многогранниками, но и телами, ограниченными совокупностью криволинейных поверхностей (конических, цилиндрических и др.).

Каждая элементарная поверхность характеризуется следующими признаками: площадью, периметром, отношением площади к квадрату периметра, длиной максимального R_{\max} , минимального R_{\min} и среднего $R_{\text{ср}}$ радиусов-векторов (соединяющих геометрический центр поверхностей с ее границей), углом между максимальным и минимальным радиусами-векторами, количеством изломов границы, координатами геометрического центра, уравнением плоскости, содержащей грань (в случае аппроксимации многогранниками), списке «соседей» элементарной поверхности. Аппроксимирующие поверхности упорядочены с помощью таких отношений, как соседство, подобие, параллелизм и т.д.

Большинство геометрических признаков рассчитываются по таким сравнительно простым математическим соотношениям, как методы аппроксимации фрагментов контурных линий уравнениями прямых и окружностей или кусочно-полиномиальным представлением контуров. Площадь объекта определяется числом, пропорциональным количеству единиц в массиве значений яркости его бинарного изображения, а периметр объекта, окруженный фоном,

$P \approx 2n(01) + 2n\left(\frac{0}{1}\right)$. Можно более точно оценить площадь и пери-

метр, воспользовавшись набором эталонных масок, объединенных в двоичные четверки. Кроме того, с помощью введенных масок определяется и еще один геометрический признак объекта – число Эйлера – разность между количеством связных областей и количеством отверстий на изображении объекта.

Форму объекта по полутонам можно определить, проанализировав профиль распределения излучаемого (или отражаемого) ими света. Существуют и другие (итерационные) способы определения формы по полутонам.

Широко используемыми геометрическими признаками служат коэффициенты формы объекта

$$k_1 \sim S / P^2; k_2 \sim R_{\max} / R_{\min}; k_3 \sim R_{\max} / P; k_4 \sim R_{\text{ср}} / R_{\min}. \quad (3.40)$$

Разработаны другие достаточно эффективные методы нахождения различных коэффициентов формы.

Формальные признаки (формальные инварианты), характеризующие контуры объектов, иногда строят путем расчета функции кривизны границы. Отметим, что алгоритмам расчета признаков по изменению кривизны контура присущ общий недостаток локальных методов – большая чувствительность к шумовым искажениям границ.

К числу используемых в СТЗ инвариантов, основанных на интегральных свойствах областей изображения, относятся моментные функционалы от функций яркости.

Определение положения и ориентации объектов. Положение характерных точек объекта в трехмерном пространстве может быть определено хорошо известными методами триангуляции при использовании стереозрения, сочетания телекамеры с дальнометрическими датчиками или при перемещении одного видеосенсора для последовательных осмотров сцены с разных точек зрения и др. Часто трехмерные задачи сводят к двумерным. Для определения местоположения объекта на опорной плоскости, как правило, ищут коор-

динаты $x_{ц}$, $y_{ц}$ геометрического центра («центра тяжести») его проекции.

Ориентация объекта определяется более сложным способом. Существуют разные способы задания ориентации: через направление оси минимального (максимального) радиуса-вектора, а также вектора, соединяющего центр тяжести объекта с какой-либо характерной точкой (например, с центром наибольшего отверстия) через эталонную ориентацию, задаваемую при обучении, и др. Например, при оценке угла ориентации методом сопоставления с эталоном можно вычислять какую-либо меру рассогласования эталонного и полученного изображений (контуров) и минимизировать ее, по шагам поворачивая одно из изображений.

Вычисление координат «центра тяжести» областей изображения. Рассмотрим случай бинарного изображения. Введем понятия замкнутой и разомкнутой областей изображения. Под замкнутой областью изображения понимается участок изображения, ограниченный замкнутым контуром, а под разомкнутой – область изображения, граница которого совпадает с границей кадра. Каждая область изображения может быть охарактеризована центром тяжести. Центр тяжести замкнутой области изображения определяется контуром этой области и при перемещении этой области в кадре перемещается вместе с ней. Координаты центра тяжести разомкнутой области изображения существенно зависят от соотношения части этой области изображения, содержащейся в кадре, и части, находящейся за кадром и не попавшей в поле зрения системы. В дальнейшем в качестве информативных признаков изображений, достаточных для их распознавания и оценки взаимных смещений, будем рассматривать координаты центров тяжести областей изображений, вес каждой области изображения (для бинарных изображений – это площадь области изображения) и признак замкнутости или разомкнутости. При необходимости оценки характеристик отдельных объектов в поле зрения СТЗ нужно знать и координаты элементов контуров изображений этих объектов. В случае использования строчно-кадрового сканирования датчиком ТИ под областью изображения будем понимать участок изображения, которому соответствует видеосигнал на выходе сканирующего приемника излучения, амплитуда которого превышает заданный порог, с ограниченной по длительности реализацией. К замкнутым элементам относятся такие,

реализации которых по времени не перекрываются с началом и концом строчной и кадровой разверток. Процесс вычисления координат центров тяжести элементов изображения для указанного случая естественно представить в виде последовательной процедуры: вначале производится вычисление координат центров тяжести реализаций видеосигнала на строках, а затем на совокупности строк, т.е. по кадру.

Вычисление координат центров тяжести реализаций видеосигнала на строке. Обозначим координату ячейки (дискрета), соответствующую началу K -й реализации на j -й строке через $I_{Hj, K}$, а координату ячейки, соответствующей концу этой реализации, — $I_{Kj, K}$. Для квантованной по амплитуде и дискретной по времени реализации координаты центра тяжести реализации можно записать через рекуррентное соотношение

$$X_{Ц_{j,i}} = I_{Hj,i} + \frac{\sum_{l=1}^{m_j} a_l (2l-1)}{2 \sum_{l=1}^{m_j} a_l}, \quad (3.41)$$

где i — номер дискреты i -й реализации по координате X с заданным шагом, a_l — вес i -й дискреты, m_i — число дискрет в i -й реализации, при этом вес i -й реализации равенства.

Априори m_i неизвестно, поэтому результат под знаком \sum должен накапливаться до тех пор, пока вес i -й дискреты a_l равен или больше заданного порога.

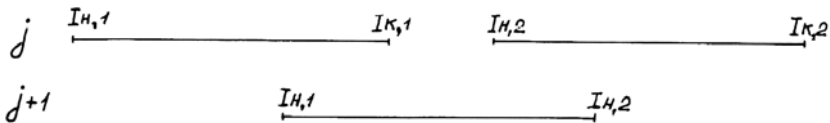


Рис. 3.21. К определению условия связности видеосигналов, принадлежащих строкам J и $J+1$

Для случая бинарного сигнала все $a_1 = 1$ преобразуется к виду

$$X_{Ц_{j,j}} = I_{H_{j,i}} + \frac{\sum_{l=1}^{m_j} a_1 (2l-1)}{2m}, \quad (3.42)$$

причем вес реализации равен m .

Проверка условия связности. Оценка принадлежности реализаций видеосигналов на j -й и $(j+1)$ -й строках может быть произведена по положению границ i реализаций на j -й строке относительно границ r -х реализаций на $(j+1)$ -й строке. Такая оценка позволяет проводить сортировку реализаций сигнала на $(j+1)$ -й строке сразу же при вводе в ЭВМ. Условие связности можно записать:

- 1) $I_{H_{j,i}} < I_{H(j+1)} < I_j$;
- 2) $I_{K(j+i),r} > I_{H_{j,i}}$.

Приведенные условия позволяют оценить связность не только отдельных реализаций на j -й и $(j+1)$ -й строках, но и связность групп реализаций на этих строках. Условие связности обеспечивает накопление центров тяжести реализаций, а также при необходимости массивов координат контуров, принадлежащих общей области изображения. Процесс накопления завершается при нарушении условий связности, при этом сформированные ранее массивы соответствуют замкнутой области изображения, и формируется признак замкнутости названного массива.

Одновременно с проверкой условий связности проводится оценка близости границ реализаций на $(j+1)$ -й строке к границам кадра, размеры которого заданы координатами X_n, X_k, Y_n, Y_k – соответственно начало строки и кадра, а X_k, Y_k – конец.

При условии, если граница какой-либо реализации близка к границам кадра для массива центров тяжести, которому принадлежит эта реализация, вырабатывается признак разомкнутости.

Рассмотрим кратко особенности описания цветных изображений. Цветные изображения, обрабатываемые в СТЗ, можно описывать, используя определенные для каждого элемента цветные коор-

динаты T_1, T_2, T_3 , содержащие количество красного, зеленого и синего основных цветов, принимаемых для уравнивания цвета данного элемента. Яркость элемента представлена в следующем виде: $Y = L_1T_1 + L_2T_2 + L_3T_3$, L_i – весовые коэффициенты.

Большое значение для обработки цветных изображений имеет выбор системы цветowych координат. В настоящее время используются три основные системы – PAL, SECAM, NTSC, особенности которых были применены при разработке систем цветного телевидения.

При цветной обработке изображений важным является выбор метода квантования цветов. Наибольшее распространение получил метод независимого квантования цветowych компонент, отличающийся простотой по сравнению со способом совместного квантования цветowych компонент. Верность воспроизведения цветowego изображения может быть количественно охарактеризована с помощью какого-либо критерия (преимущественно среднеквадратического), который должен быть согласован с мерой различия цветов и такими явлениями, как цветные полосы Маха и цветовая адаптация.

Критерий верности воспроизведения цветного изображения используется также в качестве теоретической основы оптимального проектирования в системе кодирования цветных изображений на основе преобразования системы координат цвета. Эномото и Шибата предложили другой метод кодирования цветного изображения, согласно которому преобразование применяется к полному цветovому телесигналу, яркостные и цветностные координаты последнего объединяются методом частотного перемежения. Для использования кодирования с предсказанием существует также два способа: полного цветowego сигнала и координат цвета. Одним из наиболее распространенных применений информации о цвете является выделение цветowych контуров, которое можно производить тремя способами: 1) по общему перепаду яркости; 2) по перепаду яркости на каждой из трех цветowych компонент; 3) по величине расстояния между векторами цвета по обе стороны предполагаемого перепада. В первом и втором случаях результат обнаружения контура зависит от выбранной системы координат цвета. Информация о цвете используется также на этапе сегментации и описания и анализа изображения, результатом которых является определение цвета и положения объек-

тов на основе вычислительных признаков (в том числе и цветовых, которые активно используются) с последующим построением модели.

3.2.6. Анализ изображений

На этом этапе в СТЗ осуществляется распознавание (а чаще классификация) объектов на основе построенных вышеописанными методами признаков и дается интерпретация наблюдаемой сцены. В более сложных случаях строятся (уточняются) модели проблемной среды. Применяемые в робототехнике алгоритмы распознавания можно разделить на две основные категории, базирующиеся на основе теории принятия решений (использование дискриминирующих функций) и на структурно-синтаксических методах.

Дискриминирующие функции. Пусть $x = (x_1, \dots, x_n)^2$ – вектор, представляющий некоторый объект в n -мерном пространстве признаков. Его координатами могут быть, например, любые из вышеописанных количественных характеристик формы изображения объекта, показатели его яркости, цвета, параметры математического описания в виде аналитических уравнений, значения логических переменных, указывающие на наличие или отсутствие некоторых свойств, заданных «лингвистически», и другие признаки.

Пусть имеется M классов объектов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$. В соответствии с теорией принятия решений требуется определить M дискриминирующих (решающих) функций $d_1(x), d_2(x), \dots, d_M(x)$, обладающих тем свойством, что для любого образа x^* из класса ω_i имеет место $d_i(x^*) > d_j(x)$ для всех $j = 1, 2, \dots, M, j \neq i$. При их выборе следует стремиться к тому, чтобы получающаяся ошибка классификации была по возможности меньше. Следует отметить, что весьма эффективными статистическими алгоритмами анализа изображений являются корреляционные алгоритмы распознавания.

Структурно-синтаксические методы. Методы проблемной среды. Этот подход к распознаванию образов основывается на структурных отношениях между «примитивами» (простейшими фрагментами, составляющими образ объекта) и их упорядоченными сово-

купностями. Разработано достаточно много таких различных синтаксических методов, как формальные грамматики порождения языковых описаний классов образов, представление структурных отношений в виде деревьев, графов, сетей и др.

В развитии чисто синтаксических алгоритмов предпринимаются попытки ставить в соответствие каждому алгоритму языка определенные семантические оценки, например списки логических или количественных характеристик. В СТЗ нашли применение различные структурно-синтаксические методы, например в СТЗ контроля печатных плат (см. гл. 5).

В последнее время возросло число работ, посвященных разработке алгоритмов, опирающихся на построение моделей сцены различного уровня. Так, принцип «соединения кривых» (concurves) был применен для моделирования промышленных деталей: по простым признакам элементарных сегментов контура плоских объектов (числу дуг и линейных отрезков, их длинам, площадям сегментов и отверстий, отношению минимальных моментов инерции к максимальным и т.п.) строятся модельные представления каждой детали, содержащие информацию о ее названии, симметрии, количестве кривых, количестве мультисекторов (наборов векторов, расположенных равномерно вдоль этих кривых (перпендикулярно), которые позволяют распознавать детали достаточно сложного вида.

Весьма перспективны алгоритмы, позволяющие строить модели сцены и использующие принцип действия живых организмов (биоструктур), точно-грубые алгоритмы и стратегии, позволяющие быстро локализовать объекты и обеспечить механизмы уровня, управляющие сбором данных даже в процессе интерпретации зрительной информации. Ниже описан так называемый «алгоритм пирамидальной архитектуры», реализующий концепцию интеллектуального восприятия и характеризующийся иерархической структурой данных для представления изображений.

3.2.7. Алгоритмы анализа объемных цветных изображений

Корреляционный анализ трехмерных изображений

Положение ОР в пространстве на основе обработки изображений, снимаемых с двух телевизионных камер, оценивается известными выражениями. Одной из основных проблем при использова-

нии подобных систем является обнаружение идентичных точек, для которых измеряется параллакс. В этой связи весьма перспективна корреляционная обработка стереоизображений. Введем системы координат (рис. 3.22) $XOYZ$, $X_1O_1Y_1Z_1$, $X_2O_2Y_2Z_2$, связанные соответственно с плоскостью рабочей зоны, с первым и вторым ДТИ (оси O_1X_1 , O_2X_2 первого и второго ДТИ параллельны базису съемки).

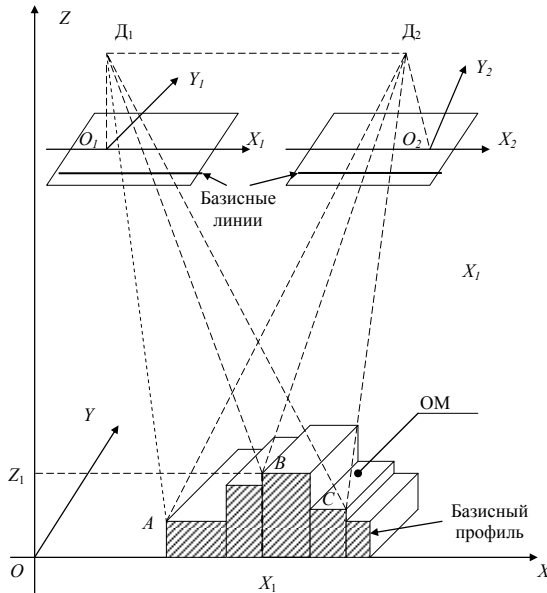


Рис. 3.22. Корреляционные основы стереоизмерений

На рис. 3.22 показаны базисный профиль, базисные линии, базис и точки D_1 , D_2 , между которыми измеряется базис. Одна и та же точка трехмерной сцены воспринимается первым (левым) ДТИ с координатами Δx_1 , Δy_1 и вторым (правым) ДТИ с координатами Δx_2 , Δy_2 . Связь между координатами этих точек находится из известного выражения

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 - p(\Delta x_2, \Delta y_2), \quad (3.43)$$

где $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ – функция продольных параллаксов, которая взаимно однозначно определяет поверхность трехмерной сцены $z(x, y)$. Восстановление $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ и составляет процесс стереоизмерений.

Построение поверхности $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ по яркостной видеоинформации, снимаемой с ДТИ, сводится к задаче оптимизации

$$p = \arg \max_p J(p), \quad (3.44)$$

где p – целевая функция, синтезированная из оценок мер схожести сравниваемых участков первого и второго изображения. Функция $J(p)$ представляет корреляционную функцию

$$J(\bar{p}) = \int \tilde{F}_1(x_1, y_1) \tilde{F}_2(x_2, y_2, \bar{p}) dx dy, \quad (3.45)$$

где $\tilde{F}_1(x_1, y_1)$, $\tilde{F}_2(x_2, y_2, \bar{p})$ – нормированные яркости первого и второго изображений; \bar{p} – параметры, описывающие взаимные геометрические искажения изображений и определяемые из условия максимума $J(p)$ в опорных точках.

Таким образом, корреляционный анализ стереоизображения состоит из следующих операций: формирование первого и второго ТИ, формирование ВКФ, вычисление смещения первого ТИ относительно второго ТИ (вычисление параллакса). После этого определяются координаты положения ОР в пространстве.

Следует отметить, что геометрические искажения, обусловленные стереоизмерениями, вызваны такими факторами, как изменение формы или яркости (раскраски) объекта.

Другим вариантом оценки положения ОР является использование трех ДТИ (рис. 3.23). Введем следующие системы координат: $XOYZ$ – система координат, связанная с рабочей зоной; $X_1O_1Y_1Z_1$, $X_2O_2Y_2Z_2$, $X_3O_3Y_3Z_3$ – системы координат, связанные соответственно с ДТИ₁, ДТИ₂, ДТИ₃. Положение ОР (центр тяжести, т.е. положение точки A) в этой системе координат определяется величинами Δx_A , Δy_A , Δz_A . Введем следующие обозначения: l_1 , l_2 , l_3 – расстояния

от соответствующих ДТИ₁, ДТИ₂, ДТИ₃ до ОР; l'_1, l'_2, l'_3 – расстояния от ДТИ₁, ДТИ₂, ДТИ₃ до соответствующих осей координат.

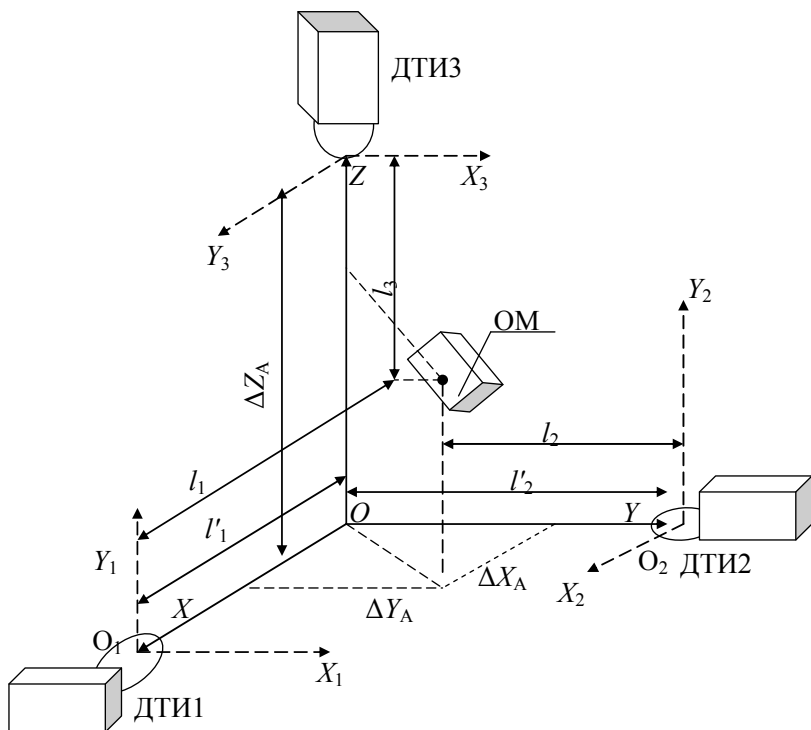


Рис. 3.23. Корреляционные основы измерения пространственного положения ОР с использованием трёх ДТИ

В общем виде положение ОР можно определить по анализу трех ВКФ, описываемых следующими выражениями:

$$\begin{cases}
 J_1, (\xi_1, \eta_1, \alpha_1) = \int_{S_1} F_1(x_1, y_1) F_1(x'_1, y'_1) ds_1; \\
 x_1 = (x'_1 - \xi'_1) \cos \alpha_1 + (y'_1 - \eta_1) \sin \alpha_1; \\
 y_1 = (y'_1 - \eta_1) \cos \alpha_1 - (x'_1 - \xi_1) \sin \alpha_1; \\
 \\
 J_2, (\xi_2, \eta_2, \alpha_2) = \int_{S_2} F_2(x_2, y_2) F_2(x'_2, y'_2) ds_2; \\
 x_2 = (x'_2 - \xi'_2) \cos \alpha_2 + (y'_2 - \eta_2) \sin \alpha_2; \\
 y_2 = (y'_2 - \eta_2) \cos \alpha_2 - (x'_2 - \xi_2) \sin \alpha_2. \\
 \\
 J_3, (\xi_3, \eta_3, \alpha_3) = \int_{S_3} F(x_3, y_3) F'_2(x'_3, y'_3) ds_3; \\
 x_3 = (x'_3 - \xi'_3) \cos \alpha_3 + (y'_3 - \eta_3) \sin \alpha_3; \\
 y_1 = (y'_3 - \eta_3) \cos \alpha_3 - (x'_3 - \xi_3) \sin \alpha_3.
 \end{cases} \quad (3.46)$$

где $F_1(x_1, y_1)$, $F_1(x_2, y_2)$, $F_1(x_3, y_3)$ – ТИ, формируемые соответствующими ДТИ₁, ДТИ₂, ДТИ₃; $F'_2(x'_1, y'_1)$, $F'_2(x', y')$, $F'_2(x'_3, y'_3)$ – ЭИ, подготовленные при съемке с соответствующих ДТИ₁, ДТИ₂, ДТИ₃; S_1, S_2, S_3 – площади коррелируемых изображений. Следует отметить, что при совмещении ТИ и ЭИ не только по угловой и линейным координатам, но и по масштабу выражения (3.46) еще более усложняются.

Рассмотрим особенности оценки местоположения объекта при использовании различного числа и комбинации ДТИ (т.е. КЭС). Например, если используются три КЭС, то координаты ОР определяются из

$$\Delta X_A = \Delta \xi_2 = \Delta \xi_3, \Delta Y_A = \Delta \xi_1 = \Delta \xi_3, \Delta Z_A = \Delta \eta_1 = \Delta \eta_2. \quad (3.47)$$

Если применяются только две КЭС (например, КСТ31 и КСТ32 и соответственно ДТИ1 и ДТИ2), то координаты ОР находятся из

$$\Delta X_A = \Delta\eta_2; \Delta Y_A = \Delta\xi_1; \Delta Z_A = \Delta\eta_1 = \Delta\eta_2. \quad (3.48)$$

При оценке КЭС величин только по одной координате, например $\Delta\xi_1$, $\Delta\eta_1, \Delta\eta_2$, искомые координаты определяются просто:

$$\Delta X_A = \Delta\eta_3; \Delta Y_A = \Delta\xi_1; \Delta Z_A = \Delta\eta_1 = \Delta\eta_2.$$

При использовании двух других зрительных систем КСТЗ₁ и КЭС₃ (с ДТИ₁ и ДТИ₃) искомые координаты определяются следующим образом:

$$\Delta X_A = \Delta\eta_3; \Delta Y_A = \Delta\xi_1 = \Delta\xi_3; \Delta Z_A = \Delta\eta_1. \quad (3.49)$$

Если определяются КЭС только величины $\Delta\eta_1$, $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$, то выражения упрощаются до вида

$$\Delta X_A = \Delta\eta_3; \Delta Y_A = \Delta\xi_3; \Delta Z_A = \Delta\eta_1.$$

В случае использования КЭС₂ и КЭС₃ (с ДТИ₂ и ДТИ₃) координаты ОР находятся из

$$\Delta X_A = \Delta\xi_2 = \Delta\eta_3, \Delta Y_A = \Delta\xi_3, \Delta Z_A = \Delta\eta_2. \quad (3.50)$$

В приведенных формулах $\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$, $\Delta\eta_1$, $\Delta\eta_2$, $\Delta\eta_3$ представляют собой координаты главного максимума соответствующих ВКФ.

Расстояния l_1 , l_2 , l_3 до ОР определяются следующими выражениями:

$$l_1 = \frac{l'_2 - \Delta x}{\cos \psi_x}; l_2 = \frac{l'_2 - \Delta y}{\cos \psi_y}; l_3 = \frac{l'_3 - \Delta z}{\cos \psi_z};$$

$$\psi_x = \arccos \frac{l'_1 - \Delta x}{l_1}; \psi_y = \arccos \frac{l'_2 - \Delta y}{l_2}; \psi_z = \arccos \frac{l'_3 - \Delta z}{l_3}, \quad (3.51)$$

где Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z – угол между направлением и соответствующими осями системы координат $XOY2$. Причем

$$l_1 \sim \Delta M_y, l_2 \sim \Delta M_z, l_3 \sim \Delta M_x, \quad (3.52)$$

где \sim – знак пропорциональности; $\Delta M_y, \Delta M_z, \Delta M_x$ – изменение масштаба ВКФ, пропорциональное изменению ТИ относительно исходного ЭИ.

Обработка и анализ цветных изображений

В общем виде цвет (Ц) изображения может быть описан следующим цветовым уравнением:

$$\text{Ц} = T_1[r_{ij}] + T_2[g_{ij}] + T_3[b_{ij}], \quad (3.53)$$

где T_1, T_2, T_3 – координаты цвета, r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} – единичные количества основных соответствующих цветов: красного (r), зеленого (g) и синего (b). Из анализа уравнения (3.53) следует, что для оценки цвета изображения необходимо разделить цвет на основные слагаемые R, G, B , а затем путем оценки сочетания этих слагаемых определить цвет изображения.

Полный процесс сравнения цветных изображений в СТЗ содержит пять основных этапов: формирование, предварительная обработка, сегментация, описание и анализ.

Сравнение цветных изображений рассматривается как динамическая система, промежуточные статические состояния которой определяются полем системы и ее характеристикой на каждом из последовательно рассматриваемых этапов обработки изображения. Поле системы представляет собой множество элементов изображения, образующих матрицу z размером $N_{\Pi} \times N_{\Pi}$. Характеристика системы включает в себя совокупность массивов R, G, B , элементы которых $r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} (i, j = \overline{0, N_{\Pi} - 1})$ характеризуют уровни красного, зеленого и синего (основных) цветов соответственно для каждого

элемента массива Z_{ij} . Множество, определяющее характеристику системы, включает в себя также набор $\{L\}$ промежуточных величин, используемых в процессе обработки изображения и вычисляемых с использованием значений элементов массивов R, G, B . В качестве элементов множества L могут выступать цветовые, геометрические, структурные и другие признаки, характеристики положения объекта, гистограммы яркости и пр.

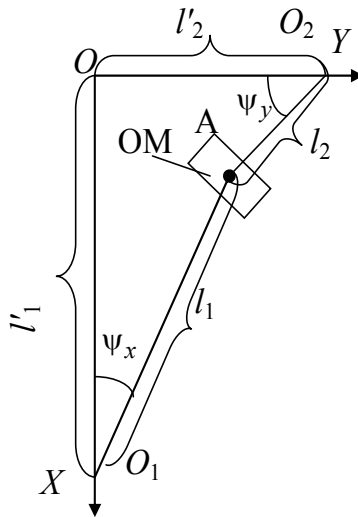


Рис. 3.24. Пример измерения положения OP в плоскостях XOY

Таким образом, процесс сравнения цветных изображений в КСТЗ представим в виде последовательной смены статических состояний A_k ($k=1,5$) динамической системы A , каждое из которых определяется набором

$$\{X, R, G, B, L\}_k, \quad (3.54)$$

где X – поле системы, $\{R, G, B, L\}_k$ – характеристика системы.

В свою очередь, каждый из массивов R , G , B может быть представлен в виде многомерной векторной функции f_r, f_g, f_b от параметров $l', m', n_{\text{ш}}$:

$$\begin{aligned} R &= f_r(l', m', n_{\text{ш}}); \\ G &= f_g(l', m', n_{\text{ш}}); \\ B &= f_b(l', m', n_{\text{ш}}), \end{aligned} \quad (3.55)$$

где l' – искомая характеристика; m' – мешающий параметр; $n_{\text{ш}}$ – случайный шум.

Величины l' , m' , $n_{\text{ш}}$ в общем случае векторные. В качестве искомого параметра l' может выступать символ класса или образа, а также различные другие характеристики системы.

Факторы, которые достаточно точно могут быть описаны каким-либо известным распределением вероятностей, могут быть представлены как случайные помехи или шум $n_{\text{ш}}$. Воздействие компонент шума на отдельные компоненты сигнала характеризуется относительной независимостью.

В качестве мешающего параметра m может быть представлена группа факторов, воздействующих на изображение в целом.

В случае монохромного изображения – красного, зеленого или синего – массивы G и B , R и B , R и G соответственно содержат лишь нулевые элементы. Так, например, для каждого элемента Z_{ij} монохромного красного изображения получаем

$$g_{ij} = [G]_{ij} = 0, \quad b_{ij} = [B]_{ij} = 0, \quad (3.56)$$

т.е.

$$f_g(l', m', n_{\text{ш}}) = 0; \quad f_b(l', m', n_{\text{ш}}) = 0; \quad f_r(l', m', n_{\text{ш}}) \neq 0. \quad (3.57)$$

В этом случае состояния A_k , $k = \overline{1,5}$ системы сравнения цветных изображений могут быть определены с помощью следующих наборов:

$$A_k = \{x, r, 0, 0, 1\}_k, \quad (3.58)$$

где 0 – массив, содержащий лишь нулевые элементы, т.е.

$$A_k = \{x, r, l\}_k. \quad (3.59)$$

Аналогичным образом можно получить следующие соотношения, определяющие состояния A_k , $k = \overline{1,5}$ системы сравнения цветных изображений для монохромных зеленого и синего, а также черно-белого изображений соответственно:

$$\begin{aligned} A_k &= \{X, 0, G, 0, L\}_k = \{X, G, L\}_k; \\ A_k &= \{X, 0, 0, B, L\}_k = \{X, B, L\}_k; \\ A_k &= \{X, 0, 0, 0, L\}_k = \{X, L\}_k. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Рассмотрим основные этапы корреляционного сравнения цветных изображений. Процедуры предварительной обработки в общем случае могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$A_1[R_0] = R_1; \quad A_1[G_0] = G_1; \quad A_1[B_0] = B_1, \quad (3.61)$$

где A_1 – оператор функций R_0, G_0, B_0 ; R_0, G_0, B_0 – массивы уравнений красного, зеленого и синего основных цветов; R_1, G_1, B_1 – комплексные массивы, полученные в результате предварительной обработки цветных изображений для методов пространственной области, запишем следующим образом:

$$r_{1,ij} = A_1[r_{0,ij}]; \quad g_{1,ij} = A_1[g_{0,ij}], \quad (3.62)$$

где $i, j = n'$, $r_{1,ij}$, $g_{1,ij}$, $b_{1,ij}$ – элементы, находящиеся на пересечении i -й строки и j -го столбца соответствующего массива R, G, B ; n' – целое число, характеризующее количество элементов массива изображения.

Если ввести обозначение элемента массива соответствующего цвета

$$R_1(i, j) = r_{1,i,j}, G_1(i, j) = g_{1,i,j}, B_1(i, j) = b_{1,i,j}, \quad (3.63)$$

то соотношения можно переписать в следующем виде:

$$r_{1,ij} = [A'_1(R_0)]_{i,j}; \quad g_{1,ij} = [A'_1(G_0)]_{i,j}; \quad b_{1,ij} = [A'_1(B_0)]_{i,j},$$

$$i, j = n',$$

где A' – соответственно операторы функций R_0, G_0, B_0 , определенные в некоторой окрестности пикселя i, j или на множестве массивов, характеризующих цвет. В соответствии с вышеизложенным представим некоторые известные алгоритмы предварительной обработки изображений применительно для обработки цветных изображений. Например, алгоритм усреднения изображения по окружности будет

$$g_{1,i,j} = \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} g_{0,l,m};$$

$$r_{1,i,j} = \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} r_{0,l,m}; \quad (3.64)$$

$$b_{1,i,j} = \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} b_{0,l,m}; \quad l, m = n''.$$

$S(i, j)$ – множество координат точек в окрестности пикселя (i, j) , n'' – положительное число, α – диаметр окружности.

Обозначив через N_0 общее число точек в окрестности пикселя (i, j) и приняв $\alpha_{l,m} = \frac{1}{N_0} \forall l,m \in S(i, j)$, получим алгоритм скользящего среднего для цветных изображений:

$$\begin{aligned} r_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} \times \sum_{r_0(l,m) \in S(i,j)} r_{0,l,m} ; \\ g_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} \times \sum_{g_0(l,m) \in S(i,j)} g_{0,l,m} ; \\ b_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} \times \sum_{b_0(l,m) \in S(i,j)} b_{0,l,m} . \end{aligned} \quad (3.65)$$

Варьируя значениями коэффициентов $\alpha_{l,m}$, а также формой окрестности S , получим различные варианты масок для фильтрации цветных изображений. Например, алгоритм ранговой фильтрации цветных изображений запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_{1,i,j} &= \max_n \sum_{(l,m) \in S(i,j)} r_{0,l,m} ; \quad g_{1,i,j} = \max_n \sum_{(l,m) \in S(i,j)} g_{0,l,m} ; \\ b_{1,i,j} &= \max_n \sum_{(l,m) \in S(i,j)} b_{0,l,m} , \end{aligned} \quad (3.66)$$

где $\max_n (\bullet)$ – операция определения какого-либо по величине элемента среди элементов окрестности. Общий вид алгоритма усреднения цветного неподвижного изображения, искаженного некоррелированным шумом с нулевым средним значением, будет:

$$r_{1,i,j} = A_1[r(0,i,j) \dots r(0,i,j)_k] ;$$

$$g_{1,i,j} = A_1[g(0,i,j) \dots g(0,i,j)_k]; \quad (3.67)$$

$$b_{1,i,j} = A_1[b(0,i,j) \dots b(0,i,j)_k]$$

ИЛИ

$$r_{1,i,j} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k r(0,i,j)l;$$

$$g_{1,i,j} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k g(0,i,j)l; \quad (3.68)$$

$$b_{1,i,j} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k b(0,i,j)l,$$

где k – число изображений.

При увеличении числа k используемых изображений массивы R_1 , G_1 , B_1 приближаются к неискаженным массивам R , G , B .

При использовании логических операций для предварительной обработки цветных изображений оператор A_1 представляет собой булеву функцию 3-го множества элементов предварительно бинаризованных массивов R , G , B , содержащихся в некоторых окрестностях $S(i, j)$ пикселя (i, j) . Предположим, что изображение представляет собой совокупность нулей и единиц. Тогда соотношения, определяющие совокупность логических операций процедуры предварительной обработки изображения, получим в следующем виде:

$$r_{1,i,j} = E\{r_{0,l,m} \in S(i, j)\};$$

$$g_{1,i,j} = E\{g_{0,l,m} \in S(i, j)\}; \quad (3.69)$$

$$b_{1,i,j} = E\{b_{0,l,m} \in S(i, j)\},$$

где E – оператор, описывающий логические операции обработки изображений. Разработаны алгоритмы сглаживания бинаризованных цветных изображений путем использования булевой алгебры.

На этапе формирования корреляционных функций формируются три цветные ВКФ, соответствующие красному, зеленому и синему цвету. Эти слагаемые ВКФ описываются следующими выражениями:

$$J_R(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^c(x_1, y_1) F_2^R(x_2', y_2') dx dy ;$$

$$J_G(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^c(x_1, y_1) F_2^G(x_2'', y_2'') dx dy ; \quad (3.70)$$

$$J_B(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^c(x_1, y_1) F_2^B(x_2''', y_2''') dx dy ,$$

где $F_1^c(x_1, y_1)$ – функция, описывающая цветное ТИ; $F_2^R(x_2', y_2')$, $F_2^G(x_2'', y_2'')$, $F_2^B(x_2''', y_2''')$ – функции, описывающие соответственно красную, зелёную и синюю компоненту цвета; K_n – коэффициент пропорциональности; S – площадь коррелируемых изображений.

Положение и цвет объекта оцениваются по анализу положения и сочетания слагаемых ВКФ. При распознавании цвета возможны два подхода (алгоритма). В первом случае определяется цвет объекта, окрашенного в какой-либо тон. Запишем следующее решающее правило:

$$\begin{aligned} \Pi_K=1, \text{ при } \Pi_3=\Pi_C=\Pi_\Pi=\Pi_{\text{ж}}=\Pi_\Gamma=\Pi_6=0 \text{ или } J_R=1, J_G=J_B=0; \\ \Pi_3=1, \text{ при } \Pi_K=\Pi_C=\Pi_\Pi=\Pi_{\text{ж}}=\Pi_\Gamma=\Pi_6=0 \text{ или } J_G=1, J_R=J_B=0; \\ \Pi_C=1, \text{ при } \Pi_K=\Pi_3=\Pi_\Pi=\Pi_{\text{ж}}=\Pi_\Gamma=\Pi_6=0 \text{ или } J_B=1, J_R=J_G=0; \\ \Pi_\Pi=1, \text{ при } \Pi_K=\Pi_C=1, \Pi_3=\Pi_{\text{ж}}=\Pi_\Gamma=\Pi_6=0 \text{ или } J_R=J_B=1, J_G=0; \\ \Pi_{\text{ж}}=1, \text{ при } \Pi_K=\Pi_3=1, \Pi_C=\Pi_\Pi=\Pi_\Gamma=\Pi_6=0 \text{ или } J_R=J_G=1, J_B=0; \end{aligned}$$

$\Pi_{\Gamma} = 1$, при $\Pi_{\text{с}} = \Pi_{\text{з}} = 1$, $\Pi_{\text{к}} = \Pi_{\text{п}} = \Pi_{\text{ж}} = \Pi_{\text{б}} = 0$ или $J_G = J_B = 1$, $J_R = 0$;
 $\Pi_{\text{б}} = 1$, при $\Pi_{\text{к}} = \Pi_{\text{з}} = \Pi_{\text{с}} = 1$, $\Pi_{\text{п}} = \Pi_{\text{ж}} = \Pi_{\text{г}} = 0$ или $J_R = J_G = J_B = 1$,

где $\Pi_{\text{к}}$, $\Pi_{\text{з}}$, $\Pi_{\text{с}}$, $\Pi_{\text{п}}$, $\Pi_{\text{ж}}$, $\Pi_{\text{г}}$, $\Pi_{\text{б}}$ – соответственно уровни красного, зеленого, синего, пурпурного, желтого, голубого и белого цветов.

Таким образом, можно определить любой цвет объекта. Во втором случае при определении цвета объекта, имеющего сложный цветовой окрас (например, областей различного цвета на общем изображении), используется дополнительное поле, несущее информацию об уровне серого цвета, по которому оценивается положение объекта, а по цветовым слагаемым ВКФ определяются необходимые цвета.

3.3. Применение структурно-перестраиваемых вычислительных сред в процессе обработки информации

Важнейшие параметры радиотехнических систем обнаружения, автоматического распознавания определяются, прежде всего, эффективностью разработанных алгоритмов адаптивной обработки сигналов, уровнем совершенства технологий распределенных вычислений, а также быстродействием запоминающих устройств большого объема. Это подтверждает вывод о том, что СТЗ системы будут эффективными только в том случае, если они создаются на базе современной электронной вычислительной техники и применяются в составе соответствующих комплексов на базе автоматизированных систем управления.

Современный период развития вычислительной техники характеризуется поисками новых принципов обработки информации и новых архитектурных решений вычислительных систем. Основным направлением этих поисков является обеспечение в первую очередь высокой производительности вычислительных систем, а также их гибкости, модульности и расширяемости. Это обусловливается тем, что в настоящее время предъявляются все более высокие требования к производительности современных вычислительных систем, возникающие при решении задач в самых различных областях.

Основной концепцией достижения высокой производительности является параллельная обработка информации, осуществляемая с

помощью многопроцессорных систем. Одним из типов многопроцессорных систем являются однородные вычислительные среды, представляющие собой матрицы, состоящие из одинаковых ячеек, т.е. процессорных элементов (перестраиваемых автоматов), соединенных регулярными связями. Наиболее важными преимуществами таких сред являются: возможность использования вычислительной мощности большого числа процессорных элементов, работающих параллельно; высокая регулярность межпроцессорных связей, которая облегчает разработку топологии СБИС, содержащих большое число процессорных элементов; слабая зависимость времени проектирования такой системы от числа процессорных элементов в ней; простота практически неограниченного модульного расширения системы; высокая надежность, обеспечиваемая за счет однотипности используемых в среде элементов, которые могут перестраиваться на решение требуемых задач в случае выхода из строя соседних элементов [6–8].

Такие перестраиваемые вычислительные среды позволяют создавать универсальные устройства управления, которые могут эффективно решать задачи различного назначения за счет гибкой программной настройки и перестройки алгоритмов управления как перед началом работы, так и в процессе функционирования системы управления, т.е. приобретают свойства как статической, так и динамической реконфигурации своей структуры.

Принципиальной особенностью предлагаемых вычислительных сред является повышенная технико-экономическая эффективность цифровой обработки сигналов, связанная с переходом на автоматный принцип обработки, включающая в себя синтез достоинств программного и аппаратного подходов; при этом программное начало закладывается в алгоритмах обработки и реализуется в архитектуре вычислительных сред, а аппаратное – в параметрах и архитектуре перестраиваемых автоматов [7].

Новый принцип обработки информации в СТЗ заключается в том, что в функциональную структуру системы вводятся перестраиваемые вычислительные среды, способные использовать единую информацию о текущей окружающей обстановке, получаемую по различным цифровым информационным каналам. Такие системы способны сформировать динамическое информационное поле о состоянии объекта, а также вырабатывать управляющие воздействия, позволяющие

решить задачу высококачественного управления при неполной информации об объекте и наделить всю систему новыми свойствами, не присущими ни одной из фиксированных структур.

В области навигации и управления движением разнообразных типов подвижных объектов активно развиваются интегрированные навигационные системы, основанные на различных технологиях (инерциально-спутниковых, микромеханических, волоконно-оптических, лазерных, микропроцессорных и т.д.). Подобные системы сочетают в себе свойства непрерывных и дискретных систем и относятся к типу событийно-управляемых (гибридных).

Гибридные системы выделяются из всего многообразия технических систем за счет особенностей своей структуры и динамики – в таких системах в различных областях фазового пространства меняются уравнения, размерность и состав фазового вектора. При их математическом описании приходится использовать как непрерывные модели (системы дифференциальных уравнений), так и дискретные (конечные автоматы), опирающиеся на различные модели времени.

Повышенные требования к точности управления сложными объектами, параметры которых (а также приложенные внешние воздействия) изменяются в широких диапазонах, приводят к использованию нелинейных законов управления – законов логического управления. Поэтому в современных сложных системах автоматического управления, например в системах управления летательными аппаратами, находят все более широкое применение логические управляющие устройства, в том числе конечные автоматы, преобразующие дискретную информацию. При этом высокое качество процессов управления обеспечивается простыми техническими средствами.

Основными качествами, выделяющими дискретные автоматы из других преобразователей информации, являются наличие дискретного множества (конечного) внутренних состояний и свойство скачкообразного перехода автомата из одного состояния в другое. Скачкообразный переход можно трактовать как мгновенный [8], который совершается, минуя промежуточные состояния, т.е. можно пренебрегать длительностью переходных процессов в автомате, считая их скачкообразными. Рассмотрим в качестве примера систему автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 3.25.

Объект управления представлен в виде

$$W_{об}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{k}{Tp+1}, \quad (3.71)$$

где T – постоянная времени объекта управления.

Динамику рассматриваемого класса систем относительно ошибки регулирования, когда $n = 2$, можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -a_2 x_2(t) - a_1 \Psi, \end{aligned} \right\} a_i > 0 \quad (i=1,2), \quad (3.72)$$

$$\Psi = \alpha f_1 + \beta f_2, \quad f_i \in [0,1] \quad (i=1,2),$$

где x_1, x_2 – фазовые координаты; a_i, α, β – постоянные коэффициенты; Ψ – разрывной коэффициент.

Величины f_i могут принимать значения либо 0, либо 1 и формируются однородной вычислительной средой (рис. 3.26) на основе информации о знаке $x_1(t)$ и о знаке линейной комбинации $x_1(t)$ и $x_2(t)$ по формулам:

при $h_2 h_4 = 0$ (рис. 3.26, а)

$$\begin{cases} f_1 = a, \\ f_2 = b, \end{cases} \quad (3.73)$$

при $h_2 h_4 = 1$ (рис. 3.23, б)

$$\begin{cases} f_1 = b, \\ f_2 = a. \end{cases} \quad (3.74)$$

Здесь

$$a = h_1 h_3 \vee h_2 h_4, \quad b = h_2 h_3 \vee h_1 h_4;$$

$$\bar{h}_1 = \text{sgn}(\text{sgn}(x_1) - 1), \bar{h}_2 = \text{sgn}(\text{sgn}(x_1) + 1);$$

$$\bar{h}_3 = \text{sgn}(\text{sgn}(s) - 1), \bar{h}_4 = \text{sgn}(\text{sgn}(s) + 1);$$

$$s = x_2(t) + c x_1(t), \quad (3.75)$$

где h_j ($j = 1, 2, \dots, 4$) – входные переменные ОС; s – прямая переключения; $\text{sgn}(A)$ – функция от аргумента A , принимающая следующие значения:

$$\text{sgn}(A) = \begin{cases} 1 & \text{при } A > 0, \\ 0 & \text{при } A = 0, \\ -1 & \text{при } A < 0. \end{cases} \quad (3.76)$$

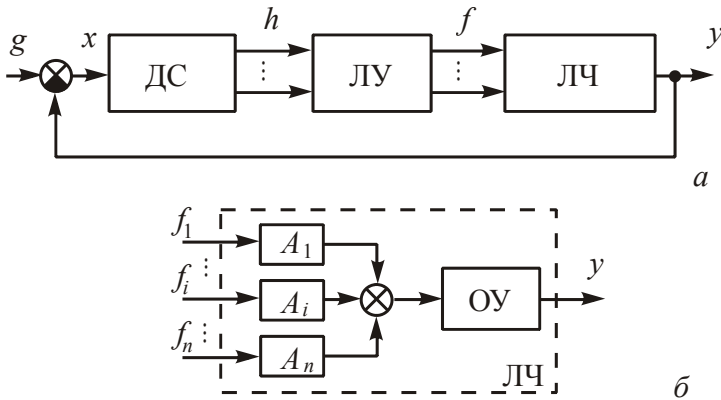


Рис. 3.25. Структурная схема: ЛЧ – линейная часть; ЛУ – логическое устройство (однородная вычислительная среда); ДС – детектор состояния; ОУ – объект управления; A_i – заданный класс динамических корректирующих звеньев ($i = 1, 2, \dots, n$)

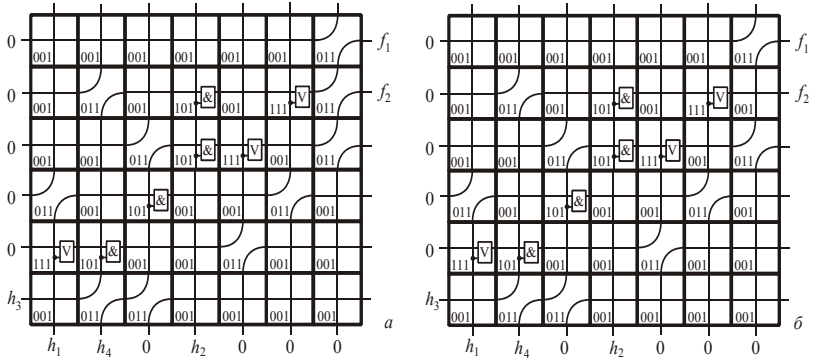


Рис. 3.26. Однородная вычислительная среда на базе M -автомата (с кодами настройки каждого автомата)

Для удобства дальнейших выводов величину Ψ можно представить в виде

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } s > 0, x_1 > 0, \\ \beta & \text{при } s < 0. \end{cases} \quad (3.77)$$

Поскольку на ЛЧ значение ошибки регулирования не поступает, а подается только сигнал известной формы, который можно представить как последовательность единичных скачков, то решение системы при фиксированной структуре имеет вид

$$x_1(\Psi, t) = x_1(\Psi, 0) + \frac{-a_1\Psi t - \exp(-a_2 t)x_2(\Psi, 0) + x_2(\Psi, 0)}{a_2} + \frac{(-\exp(-a_2 t)\Psi + \Psi)a_1}{a_2^2}; \quad (3.78)$$

$$x_2(\Psi, t) = \exp(-a_2 t)x_2(\Psi, 0) + \frac{(\exp(-a_2 t)\Psi - \Psi)a_1}{a_2}. \quad (3.79)$$

Используя полученные решения, можно построить фазовые портреты в фиксированных структурах рассматриваемого класса систем при $\Psi = \beta$, $\beta < 0$ (рис. 3.27, а) и $\Psi = \alpha$, $\alpha > 0$ (рис. 3.27, б).

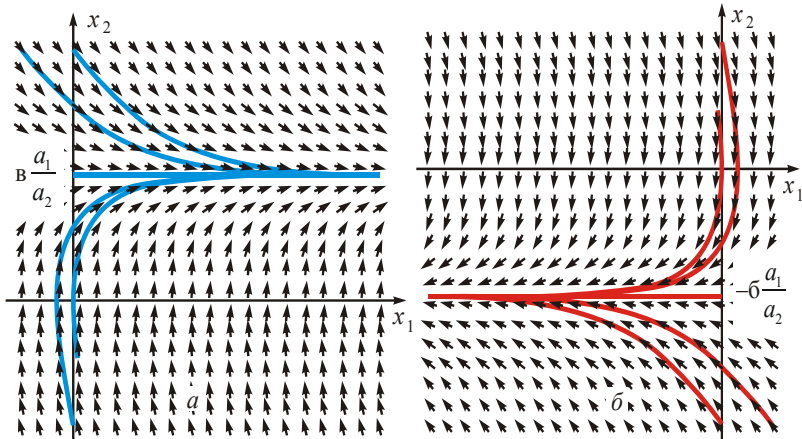


Рис. 3.27. Фазовый портрет в фиксированных структурах

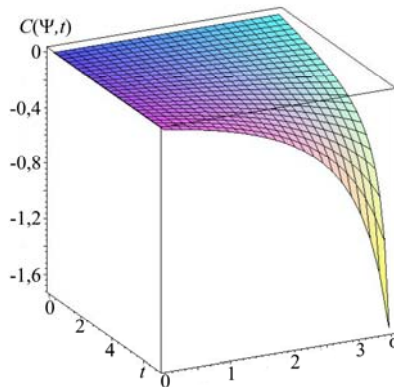


Рис. 3.28. График зависимости $c(\Psi, t)$

Пусть значение постоянной времени $T = 97,7$ с. Тогда $a_1 = a_2 = 1/97,7$. При нулевых начальных условиях на вход системы

поступает задающее воздействие $g = 1$. Необходимо, чтобы при $c = 0,7$ в момент времени $t_{\text{пер}} = 7$ с в системе начался скользящий режим.

При начальных условиях ($x_1 = 1, x_2 = 0, \Psi = \alpha$) выбираем такое α , чтобы система за промежуток времени 7 с попала на гиперплоскость S , расположенную под углом $\text{tg}(c)$ к оси абсцисс. Для этого строим зависимость $c(\Psi, t)|_{\Psi=\alpha}, t \in [0 \dots 7]$ (рис. 3.28), откуда определяем, что при $c = 0,7$ и $t_{\text{пер}} = 7$ $\alpha = 2,91$.

Определим $x_2(\Psi, t_{\text{пер}})|_{\Psi=\alpha} = -0,201$. Фиксируя значение $x_2(\Psi, 0)|_{\Psi=\beta} = x_2(\Psi, t_{\text{пер}})|_{\Psi=\alpha}$, определяем величину β :

$$\beta < \frac{(c - a_2)x_2(\Psi, 0)|_{\Psi=\beta}}{a_1}, \quad (3.80)$$

т.е. $\beta < -13,55$.

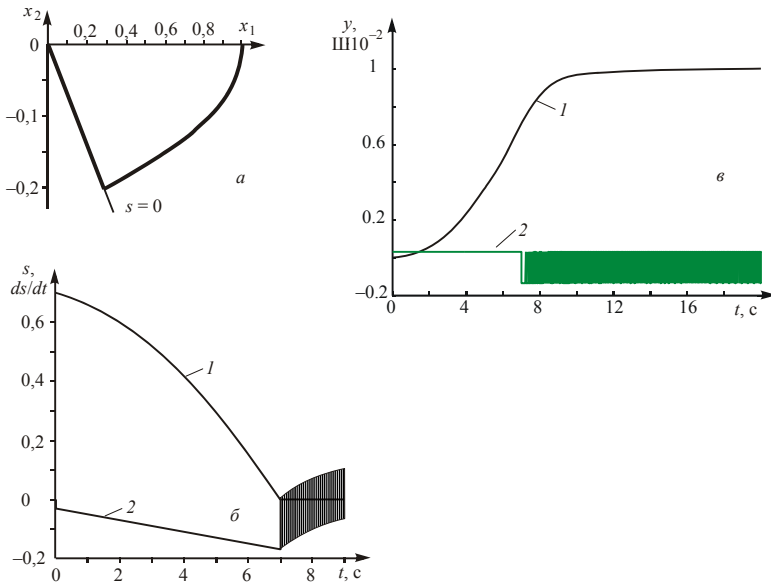


Рис. 3.29. Результаты моделирования работы системы: a – фазовая траектория; \bar{b} – динамические характеристики (кр. 1 – s , кр. 2 – ds/dt); v – динамические характеристики (кр. 1 – переходный процесс, кр. 2 – значения разрывного коэффициента)

Из полученного неравенства выбираем значение $\beta = -13,6$.

Для того чтобы в рассматриваемой системе возник скользящий режим в момент времени $t_{\text{пер}} = 7$ с при $c = 0,7$, разрывные коэффициенты должны удовлетворять следующим требованиям: $\alpha = 2,91$, $\beta = -13,6$. Результаты моделирования работы рассчитанной системы представлены на рис. 3.29.

Таким образом, используя перестраиваемые вычислительные среды, удалось решить задачу высококачественного управления, при этом управляющее воздействие формируется на базе только информации о знаке ошибки регулирования и ее производной, а не на основе их численных значений.

3.4. Применение нейронечеткого алгоритма для распознавания образов

На протяжении последних десятилетий остается актуальной проблема распознавания нефтеперспективных геоструктур по результатам анализа и интерпретации геолого-геофизического материала. Задача усложняется пересечением (размытием) классов объектов по всем количественным и качественным признакам (например, нефть, вода с признаками нефти, водонефтяной, газонефтяной и газоводный контакт), вследствие чего неприменимы вероятностно-статистические методы анализа информации, а существующие в настоящее время интеллектуальные системы обработки картографических данных, основанные на нейросетевом подходе, не обеспечивают требуемое качество и логическую интерпретацию (объяснение) прогноза. При таких условиях возрастающие требования к системам автоматизированной диагностики и прогноза по быстродействию, надежности и точности обуславливают необходимость разработки новых нетривиальных и совершенствования существующих методов и средств обработки информации и управления. Перспективные пути решения этой проблемы связаны с комплексным применением интеллектуальных технологий, включающих методы нечеткой логики и нейронных сетей для создания принципиально нового инструмента интерпретации и прогноза нефтеперспективных геоструктур. Подход к построению таких интеллектуальных подсистем на основе комбинации нейросетевой технологии и нечеткой логики применим ко многим существующим ГИС-системам, так как во многих случа-

ях улучшение существующих алгоритмов можно произвести с минимальными затратами с использованием существующего программно-аппаратного обеспечения [5, 13]. Следует отметить, что несмотря на обширные теоретические исследования в этой области, до сих пор окончательно не решены вопросы нечеткого распознавания нелинейных пересекающихся классов объектов. В частности, в практике современной камеральной обработки геолого-геофизического материала открытыми остаются вопросы использования современной информационной технологии, включающей схемы обучения и прогнозирования с использованием нейронечеткой сети, остается открытым вопрос об алгоритме интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений на базе нечеткой логики. В связи с изложенным актуальной становится задача разработки аналитической модели интерпретации и анализа геолого-геофизических данных с применением нейросетевых алгоритмов, повышения точности распознавания образов на основе построения нейронечетких портретов, объединяющих в себе интенциональные и экстенциональные методы распознавания, адаптации и контроля качества алгоритмов, позволяющих интеллектуальной подсистеме в составе ГИС картографировать прогнозные зоны, пространственно приуроченные к залежам нефти, газа, с логическим объяснением механизма прогноза.

3.4.1. Постановка задачи

По исследуемой площади имеется набор численных значений N_p геофизических и геохимических параметров полевых данных, замеренных по сетке профилей с определенным шагом, а также S разведочных скважин с актами испытаний и каротажными оцифрованными диаграммами испытаний, разбитых по своей принадлежности на классы: k_1 – нефтяные (газовые), k_2 – водно-нефтяной контакт, k_3 – вода, k_4 – порода. По этим данным необходимо рассчитать значения комплексного прогнозного параметра по регулярной сети, представляющего вероятность наличия нефти (газа), воды и породы в данной точке площади. Для решения задачи строится нечеткая система распознавания. При формировании базы знаний за основу взята идея построения интегральных характеристик классов образов в виде нечетких множеств – значений лингвистических переменных, описы-

вающих классы образов по признакам. Принятие решения о принадлежности рассматриваемого образца к определенному виду выполняется методами логического нечеткого вывода.

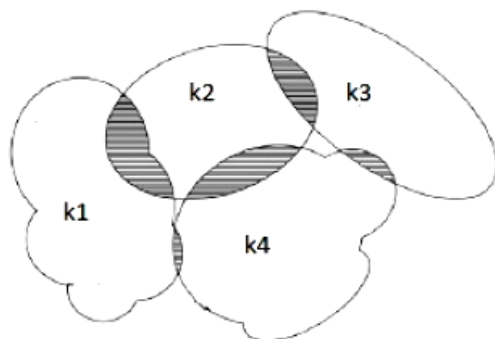


Рис. 3.30. Схема взаимного пересечения классов образов

Накопленная информация по каждой съемке в окрестности разведочной скважины используется в качестве эталонной для определения класса рассматриваемого набора образца. Отсутствие универсальных измеряемых параметров и неоднородный характер накопленной информации сдерживают развитие методов и приборов для автоматизации процессов камеральной обработки геолого-геофизического материала. Существующие разработки обладают рядом недостатков и ограничений в использовании. Например, в работе [11] предлагается нейросетевой метод расчета комплексного прогнозного параметра по снятым геофизическим и геохимическим данным, которые обрабатываются нейросетевым алгоритмом. Однако алгоритм ориентирован на уникальный прибор, предложенный автором указанного метода. В качестве классов образов в данной задаче рассматриваются определенного вида образцы (нефть, вода, порода) в соответствии с результатами разведочного бурения. В реальных условиях основной особенностью исходных данных является полное или частичное совпадение некоторых классов образов, а также размытый характер классов (промышленные притоки нефти, водно-нефтяной контакт и т.д.). Весьма условно схема взаимного пересечения классов образов представлена на рис. 3.30, области пересечения классов образов заштрихованы. Наличие пересечений

между классами образов связано как с зашумлением граничных областей классов образов, так и со сложной структурой залежей углеводородов. В ситуациях, когда рассматриваемый образец попадает в области пересечений классов образов и не удастся дать однозначный ответ о принадлежности к определенному классу образов, важно получить ответ о степени похожести образца на каждый из предполагаемых классов образов, а иногда определить, что это точно не образец определенного класса образов.

В связи с этим предлагается ответ получать в виде нечеткого множества, элементы которого – классы образов. Формально постановку задачи распознавания нефтяной геоструктуры можно рассматривать как нечеткую модификацию задачи классификации в многомерном пространстве.

Пусть дана обучающая выборка

$$Y = \{(x^{(i)}, v^{(i)}), x^{(i)} \in X, v^{(i)} \in V, i = 1, \dots, n\}, \quad (3.81)$$

где $x^{(i)} \in X \subset R^m$ – векторы m -мерного пространства – набор информативных признаков; $V = \{v_i | i = 1 \dots k\}, v_i \in N$ – множество номеров классов образов.

Пары $(x^{(i)}, v^{(i)})$ определяют, представителем какого класса образов n (i) является образ $x^{(i)}$. В общем случае необходимо определить степень принадлежности образа \bar{x}^j рассматриваемым классам, т.е. построить нечеткое множество

$$\tilde{y}_x = \sum_{i=1}^k \frac{\mu_x(v_i)}{v_i}, \quad (3.82)$$

где $\mu_x(v_i)$ – степень принадлежности образа \bar{x}^j классу v_i . Здесь и далее обозначения соответствуют введенным в классической теории нечетких множеств [3].

3.4.2. Алгоритм распознавания образов на основе нейронечетких портретов

Итак, задача классификации геолого-геофизических материалов сводится к нечеткой модификации задачи распознавания образов. Автором в [14] был предложен алгоритм распознавания образов, основанный на нечетких портретах классов образов. Основная идея алгоритма заключается в представлении исходной информации о классах в виде их нечетких портретов, которые формируются в результате анализа обучающей выборки. Такие портреты описываются совокупностью лингвистических переменных, соответствующих информативным признакам. Терм-множества этих лингвистических переменных описывают значение признака для каждого из классов образов и строятся в результате анализа частоты встречаемости значений признака в каждом классе образов. В отличие от метрических алгоритмов распознавания образов, таких, например, как алгоритм k -ближайших соседей или метод потенциальных функций, где в рассмотрение берется каждая точка обучающей выборки, в предлагаемом подходе знания о выборке прецедентов обобщаются. В результате нет необходимости хранить в памяти сведения о всех реализациях обучающей выборки, что дает выигрыш по объему памяти. На основе анализа выборки прецедентов строится нечеткая система, основанная на лингвистических переменных. База знаний формируется по построенным нечетким портретам. Решение принимается алгоритмом нечеткого логического вывода. Результат работы алгоритма представляется нечетким множеством.

3.4.3. Извлечение знаний в виде интегральных характеристик классов образов

Рассмотрим механизм анализа и извлечения знаний по выборке прецедентов. Результатом такого анализа являются нечеткие портреты классов образов. Остановимся более подробно на алгоритме построения таких «портретов». В рассмотрение берутся признаки с низкой попарной корреляцией, поэтому данные по каждому показателю рассматриваются независимо друг от друга. Первоначальный выбор информативных признаков в задаче классификации материалов осуществляется экспертом. Для каждого информативного при-

знака P_i , $i=1, \dots, m$, определим лингвистическую переменную: $\{ (), , , , \} i i i i i L L = \text{имя } P T U G M$, где U_i – множество значений признака P_i ; $\{ 1, \dots, \} i j T = m j = k$ – терм-множество лингвистической переменной; $() [0,1] i j i m p r x \hat{I}$ – функция принадлежности, определяющая степень уверенности, с которой образ x относится к классу образов j , причем $i p r x$ определяет значение признака P_i для образа x .

Синтаксическое правило G , порождающее названия переменных, в данном случае тривиально, так как все термы атомарные, и заключается в присвоении функции принадлежности имени класса, который она представляет. Семантическое правило M представлено в виде алгоритма формирования функций принадлежности, который основан на концепции скользящего окна и является расширением подхода, используемого при построении гистограмм в статистике. Вид функций принадлежности зависит от выбора коэффициентов α и β , которые фактически определяют ширину скользящего окна и шаг скольжения и являются настраиваемыми параметрами алгоритма распознавания.

Нечеткий портрет первого порядка S_j класса v_j определяется как совокупность значений лингвистических переменных, соответствующих классу v_j :

$$\{ 1, \dots, \} . j j i S = m i = m. \quad (3.83)$$

Для каждого нечеткого портрета S_j строится правило нечеткого вывода по определенным ранее лингвистическим переменным.

3.4.4. Построение нейронечеткой системы распознавания образов

Нечеткие системы весьма успешно показали себя для решения задач управления объектами, для которых получить модель в рамках классической теории управления невозможно или нецелесообразно в связи с неполнотой данных и высокой сложностью моделей [14]. Системы распознавания образов также включают в себя нечеткие модели, однако в этих случаях чаще используются гибридные модели [15]. Построим нечеткую систему, основанную на правилах с лингвистическими переменными, схема которой представлена на

рис. 3.31. На вход системы подается m -мерный вектор $x\phi$. Для каждой компоненты вектора $x\phi$, $i = 1, \dots, m$ в блоке «фаззификатор» строится синглетон – одноточечное нечеткое множество. На втором этапе выполняется обработка данных с помощью механизма нечеткого вывода, который состоит из базы знаний и нечеткого процессора. База знаний строится по нечетким портретам, полученным на этапе анализа выборки прецедентов. Следует отметить, что стандартный для систем данного типа блок «дефаззификации» отсутствует и заменен «анализатором», где строится модифицированное нечеткое множество $y\%$. Рассмотрим способ формирования базы знаний. Каждое ее правило соответствует нечеткому портрету класса образов.

ПРАВИЛО «S1»: ЕСЛИ «L1 есть v1» И... И «Li есть v1» И ... И «Lm есть v1», ТО «l n% есть V1»; ЕСЛИ «L1 есть vj» «Li есть vj» И «Lm есть vj», ТО «l n% есть Vj».

ПРАВИЛО «Sk»: ЕСЛИ «L1 есть vk» И... И «Li есть vk» И ... И «Lm есть vk», ТО «l n% есть Vk». В нечетком предикате «Li есть vj» лингвистическая переменная соответствует построенной на этапе анализа выборки прецедентов, а vj – имя класса образов, соответствующее значениям лингвистической переменной. Количество нечетких предикатов в поле «ЕСЛИ» правила соответствует m информативным признакам.

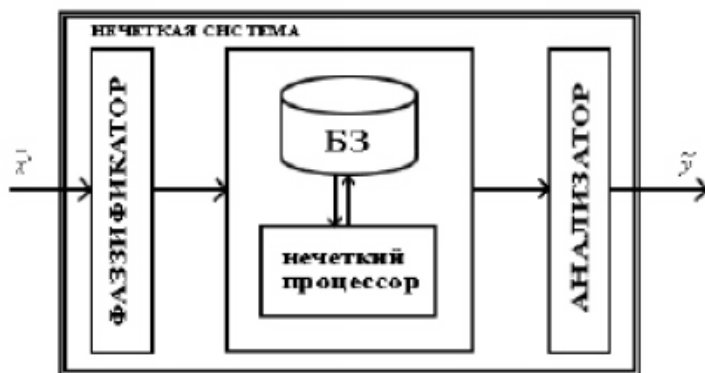


Рис. 3.31. Схема нечеткой системы распознавания с нечетким выходом

В поле «ТО» нечеткое множество V_j является монотонной функцией, что используется в алгоритме нечеткого вывода Цукано. Принятие решения осуществляется на основе механизма нечеткого вывода. Следует отметить, что в качестве операции «И» на этапе агрегирования используется m -местная логарифмическая функция.

Результатом работы алгоритма нечеткого вывода является совокупность синглетонов $v_j \sim, j = 1, \dots, k$. Как было отмечено ранее, часть классов образов априори пересекается, поэтому в качестве результата работы классификатора важно получить список классов, в область пересечения которых попадает рассматриваемый образ x . Сохранить информацию о степени схожести на каждый из возможных классов образов позволяет блок «анализатор», работающий по следующему принципу. На его вход поступает дискретное нечеткое множество $\{1, \dots, j \mid n \mid j = k\}$, где каждый элемент несет информацию о соответствии рассматриваемого образца j -му классу образов. Отсутствие элементов с ненулевыми значениями функции принадлежности сигнализирует об отсутствии в обучающей выборке соответствующего рассматриваемому образцу класса образов. В противном случае элементы множества сортируются по возрастанию степеней принадлежности. Результирующее нечеткое множество u (выход нечеткой системы) формируется по трем лидирующим классам образов, если таковые существуют, либо по меньшему их числу.

3.4.5. Адаптация и контроль качества алгоритма

В предлагаемом алгоритме этап адаптации осуществляется за счет выбора параметров α и β по результатам серии экспериментов. Поиск наилучшего решения затруднен отсутствием общепризнанных универсальных критериев качества решений. На практике для оптимизации небольшого числа параметров используют функционалы скользящего контроля. Фактически методами скользящего контроля измеряется обобщающая способность метода обучения на заданной конечной выборке. В полной мере оценить обобщающую способность алгоритма позволяет комбинаторный функционал полного скользящего контроля: μ – алгоритм распознавания, настраиваемый по конечной совокупности объектов XL , где $(l, k) \in X \times X, n =$

$= 1, \dots, N$ – всевозможные разбиения выборки XL на обучающую и контрольную, $L = l, \dots, k$; $n(m, XL)$ – частота ошибок алгоритма μ на обучающей выборке XL . Для некоторых алгоритмов получены эффективные формулы вычисления функционала полного скользящего контроля, как, например, для алгоритма k -ближайших соседей, где он вычисляется через профиль компактности. Однако с увеличением объема обучающей выборки его вычисления становятся ресурсоемкими и затратными по времени. Такими же недостатками обладает функционал среднего отклонения частоты ошибок на контроле от частоты ошибок на обучении.

Решить данную проблему возможно, используя механизм k -кратного скользящего контроля (k -fold cross validation), вычислительная сложность которого уменьшается за счет способа формирования разбиения выборки прецедентов. Экспериментально показано, что функционал k -кратного скользящего контроля не менее эффективен, чем дорогостоящий функционал полного скользящего контроля, при $k = 10$. Для поиска оптимальных значений параметров α и β был разработан экспериментальный комплекс в системе Matlab, схема которого представлена на рис. 3.32.

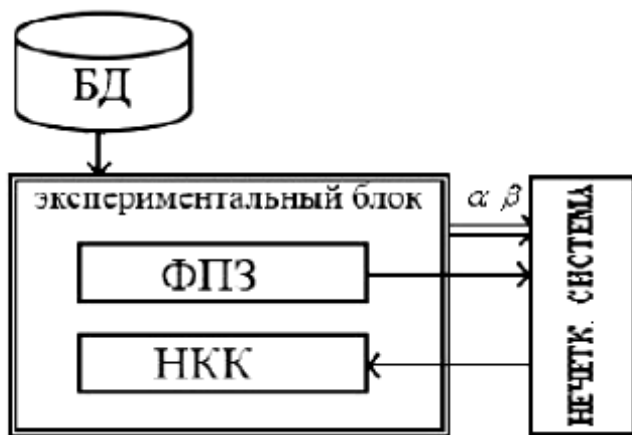


Рис. 3.32. Экспериментальная схема поиска оптимального решения

Экспериментальный блок состоит из двух базовых компонентов: ФПЗ и НКК. Первый отвечает за формирование всевозможных разбиений выборки прецедентов на обучающую и тестовую, а второй осуществляет вычисление функционалов контроля качества по результатам работы нечеткой системы на сформированных заданиях. В результате определяются оптимальные α и β по критерию, где множества A и B определяют диапазоны возможных значений параметров алгоритма. Для данной задачи $A\hat{I}$ [0.01,0.5] и $B\hat{I}$ [0.5,5]. В результате серии экспериментов для задачи распознавания нефти в качестве оптимальных параметров были определены $\alpha = 0,1$ и $\beta = 4$, что обеспечило 92 % верно распознанных образов.

Тесты к главе 3

1. К аппаратной совместимости не относят:
 - а) Конструктивную совместимость используемых разъемов.
 - б) Совместимость операционных систем.
 - в) Энергетическую совместимость по напряжениям и токам питания.
 - г) Сигнальную совместимость по уровням аналоговых и цифровых сигналов, их временным характеристикам.

2. Способность СТЗ безотказно работать в течение определенного времени – это:
 - а) Надежность.
 - б) Устойчивость.
 - в) Долговечность.

3. Что из перечисленного не входит в основные этапы алгоритма обработки зрительной информации?
 - а) Сегментация.
 - б) Анализ изображения.
 - в) Формирование.
 - г) Все этапы входят в алгоритм.

4. Процесс разбиения изображения сцены на составные части – это:
 - 1) Анализ изображения.
 - 2) Формирование.
 - 3) Сегментация.
 - 4) Описание изображения.

5. Преобразование изображения в совокупность его количественных (числовых) и качественных (логических, вербальных) характеристик – это:
- Анализ изображения.
 - Формирование.
 - Сегментация.
 - Описание изображения.
6. Не существует СТЗ:
- Активных.
 - Полуактивных.
 - Пассивных.
7. Какой элемент из перечисленных не входит в структурно-функциональную схему системы охраны?
- Устройство памяти.
 - Силы реагирования.
 - Сервисный персонал.
8. Какой из нижеперечисленных датчиков является детектором уровня освещенности или оптической контрастности в охраняемой зоне?
- Фотоэлектрический.
 - Оптоэлектронный.
 - ИК-детекторы.
9. Определите модуль аналогово-охранного телевидения:
- Видеомагнитофон.
 - WEB-камера.
 - Видеорегистратор на жестком диске.

Контрольные вопросы к главе 3

- Поясните назначение СТЗ, приведите структурную схему СТЗ промышленного робота.
- Каковы основные классификации СТЗ, каковы особенности применения СТЗ?
- Обоснуйте требования, предъявляемые к СТЗ.
- Приведите обобщенный алгоритм обработки зрительной информации.
- Изложите алгоритм формирования изображений.
- Обоснуйте применение алгоритмов предварительной обработки изображений. Какие алгоритмы более быстродействующие?
- Что представляет собой сегментация изображений?
- Как происходит кодирование изображений? Как выделяются контуры изображений?

9. Приведите алгоритмы анализа черно-белых и цветных изображений.
10. Поясните алгоритмы анализа объемных изображений.
11. В чем суть корреляционного сравнения изображений?
12. Изложите применение структурно-перестраиваемых сред в процессе обработки информации.
13. Поясните цель и принципы действия интегрированных систем охраны.
14. Обоснуйте применение различных датчиков в системах охраны.
15. Какие языки программирования информационных систем вам известны?
16. Перечислите основные блоки программного обеспечения СТЗ.

Список литературы к главе 3

1. *Системы* технического зрения: справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др. ; под общ. ред. В.И. Сырякина, В.С. Титова. Томск, 1992. 367 с.
2. *Мошкин В.И. и др.* Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
3. *Гедзберг Ю.М.* Охранное телевидение. М.: Горячая линия–Телеком, 2005. 312 с.
4. *Малюк А.А.* Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации: учеб. пособие. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 280 с.
5. *Магауенов Р.Г.* Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М.: Горячая Линия–Телеком, 2004. 368 с.
6. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. Томск, 2006. 288 с.
7. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. Томск, 2007. 192 с.
8. *Глушков В.М., Капитанова Ю.В., Мищенко А.Т.* Логическое проектирование дискретных устройств. Киев: Наук. думка, 1987. 264 с.
9. *Давидов М.И., Антонов В.Г.* LEX-генератор программ лексического анализа. М., 1985.
10. *Justin J.* Сром BASIC Face-off // PC Tech Journal. 1987. Sept. P. 136.
11. *Керниган Б.В., Ритчи Д., Фьюэр А.* Язык программирования Си. М.: Финансы и статистика, 1985.
12. *Золотарев В.В.* Основы автоматизации. М., 1978. Ч. 1.
13. *Ваулин А.С.* Языки программирования. М., 1993. Кн. 5.
14. *Терренс П.* Языки программирования: разработка и реализация. М., 1979.
15. *Касванде Э.Г.* Введение в программирование на языке Ассемблер. М. : Юнити-Дана, 2006. Ч. 1.

-
16. *Хротко Г.* Языки программирования высокого уровня. М., 1982.
 17. *Малютин Э.А., Малютина Л.В.* Языки программирования. М., 1982.
 18. *Ушкова В.* Новые языки программирования и тенденции их развития. М., 1982.
 19. *Хьювенен Э., Сеппенен Й.* Мир Лиспа. М.: Наука, 1990. Т. 1.
 20. *Янг С.* Алгоритмические языки реального времени. М., 1985.

Глава 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

4.1. Введение

Метрологии информационных систем придается большое значение [1–3]. Поэтому реализация и эксплуатация информационных систем (ИС), используемых в мехатронике, требуют обязательного рассмотрения вопросов метрологии.

Метрология (*metrology*) – сфера деятельности и наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [4].

Измерение (*measurement*) – познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины (*of a measurand*) опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений [Там же].

Измеряемая величина (*measurand*) – величина, подлежащая измерению [Там же].

Величина (*quantity*) – свойство (атрибут) физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно [Там же].

Размер величины (*size of a quantity*) – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «величина» [Там же].

Значение величины (*value of a quantity*) – выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц [Там же].

Единица величины (*unit of a quantity*) – величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице [Там же].

Единство измерений (*traceability of a measurement*) – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью [Там же].

Достижение единства измерений приводит к обеспечению взаимного доверия к результатам измерений вне зависимости от места

их выполнения. Подобное состояние измерений приобретает особое значение для научного, технического и экономического сотрудничества и торговли, при разрешении спорных вопросов и претензий как внутри стран, так и на межгосударственном уровне. Не случайно поэтому первым межгосударственным соглашением в истории нашей планеты, подписанным 20 мая 1875 г., явилась Метрическая конвенция, а первой межправительственной организацией – Международное бюро мер и весов (МБМВ или в латинской аббревиатуре французского происхождения – BIPM).

Государственное управление по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Государственный комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт РФ) через государственные научные метрологические центры (метрологические институты), территориальные органы государственного метрологического надзора, действующие во всех субъектах Федерации, а также через метрологические службы юридических лиц, аккредитованные в установленном порядке.

Метрологическое обеспечение (*metrological assurance*) – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, которые выполняются во всех без исключения сферах деятельности человека [Там же].

Метрологическое обеспечение отраслей науки и промышленности, экологического мониторинга, здравоохранения, торговли, контроля безопасности, вооружений и судебного производства заключается в выполнении следующих основных функций:

– разработка, изготовление и хранение государственных эталонов, воспроизводящих единицы измеряемых величин;

– осуществление международных сличений государственных эталонов, передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений;

– разработка законодательных актов и нормативных документов в области метрологии и практических измерений, контроль за их исполнением;

– разработка и промышленный выпуск рабочих средств измерений;

– контроль за состоянием и сохранностью декларированных производителем метрологических свойств средств измерений, выпус-

каемых из производства, а также находящихся в эксплуатации или на хранении;

– выполнение рабочих измерений во всех сферах деятельности и в отраслях народного хозяйства;

– разработка методик выполнения измерений, включающих в себя методики оценки характеристик погрешностей результатов измерений, выполнение измерений, контроль за исполнением методик выполнения измерений.

Основные работы по метрологическому обеспечению, выполняемые в интересах государства, а именно, разработка и хранение государственных эталонов, фундаментальные исследования в области метрологии, разработка государственных нормативных документов, государственный метрологический надзор, подлежат обязательному государственному финансированию. При разработке федеральных и иных государственных программ, в том числе программ создания и развития производства оборонной техники, в них должны быть предусмотрены разделы метрологического обеспечения.

К подобным программам относятся программы обеспечения всех видов безопасности населения по отношению к причинам техногенного, экологического, медицинского, преступного и иного характера.

4.2. Общие сведения о метрологическом обеспечении ИУС

Применительно к ИУС, используемых, например, в робототехнике, под измерением понимается операция распознавания формы, цвета, а также определение положения и нахождение характеристик объекта распознавания (ОР): длина, ширина, периметр и другие информационные признаки изображения. Найденные значения называются результатом измерения. ИС является сложным устройством, получающим необходимое значение искомой величины путем косвенных измерений (по известной математической зависимости (корреляционной функции) между текущими и эталонными функциями). Измерения, производимые ИС, являются совокупными, так как производится одновременное измерение одной или нескольких величин.

Метрологические характеристики ИС – это характеристики свойств зрительной системы, включая их алгоритмическое, аппара-

турное и программное обеспечение, которые влияют на результаты и погрешности измерений. Погрешности измерения – отклонение результатов измерений (значение величины, найденное путем ее измерения) от истинного значения измеренной величины. К основным метрологическим характеристикам ИС согласно ГОСТ 8.009–84 [2] следует отнести:

- 1) характеристики, определяющие результаты измерений: функция преобразования, цена деления, вид выходного кода и др.;
- 2) точностные характеристики ИС;
- 3) характеристики чувствительности ИС к внешним факторам, влияющим на работу ИС: неравномерность освещенности ТИ в рабочей зоне, вибрации и др.;
- 4) динамические характеристики;
- 5) характеристики, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений вследствие взаимодействия ИС с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов (например, ЭИ, формирующие блики);
- 6) неинформативные или информативные сигналы входного или выходного сигнала ИУС.

Внедрение и эксплуатация ИС обязательно предполагают их поверку. Под поверкой ИС понимается определение метрологической службой (подразделением) погрешностей зрительной системы и установление ее пригодности к эксплуатации.

Обязательным является также нормирование метрологических характеристик ИУС.

4.3. Метрологические характеристики информационных систем

Характеристики, определяющие результаты измерения ИС, описываются следующим образом:

1. Функция преобразования (корреляционная функция) – зависимость информативного параметра выходного сигнала ИУС от информативного параметра его входного сигнала (т.е. зависимость параметров выходного сигнала ИС, описывающего корреляционную функцию, от параметров сигнала, характеризующего рабочую зону (тип, положение и взаимосвязь объектов) считываемой датчиком ТИ.

2. Значение однозначной или значение многозначной меры – физическая измеряемая величина (например, координаты Δx_i , Δy_i , $\Delta \alpha_i$), выдаваемая ИС, используемой в качестве мерительного (эталонного) устройства.

3. Параметры выходного сигнала – вид выходного кода (число разрядов, цена единицы наименьшего разряда), предназначенного для выдачи результатов в цифровом виде, или амплитуда и диапазон изменения выходного сигнала, предназначенного для выдачи результатов в аналоговом виде.

Характеристики, описывающие точность (погрешность) работы ИС, представляются следующими величинами (для простоты рассмотрим погрешность определения положения ОР на плоскости):

1. Значение систематической составляющей δ_x , δ_y , δ_α , математическое ожидание ΔM_x , ΔM_y , ΔM_α и среднее квадратическое отклонение σ_x^δ , σ_y^δ , σ_α^δ систематической составляющей погрешности.

2. Среднее квадратическое отклонение σ_x , σ_y , σ_α случайной составляющей погрешности (а также автокорреляционная функция или функция спектральной плотности случайной составляющей погрешности).

3. Случайная составляющая σ_x^H , σ_y^H , σ_α^H погрешности от гистерезиса – вариация показания ИС.

4. Характеристика погрешности в интервале влияющей величины (систематические и случайные составляющие погрешности).

5. Помехоустойчивость – сохранение работоспособности системы при наличии помех различного вида (мультипликативные, аддитивные). Характеристикой помехоустойчивости является вероятность p правильной работы, определяемая отношением числа правильных «ответов» $n_{\text{пр}}$ ИС к общему числу испытаний $n_{\text{об}}$, т.е. $p = n_{\text{пр}}/n_{\text{об}}$. Этой величиной оценивается также вероятность p правильного распознавания цвета. Помехоустойчивость может также оцениваться коэффициентом k , пропорциональным отношению совпадающей части $S_{\text{ч}}$ (присутствуют ТИ и ЭИ) к несовпадающей части $N_{\text{ч}}$ (присутствует либо на ТИ, либо на ЭИ) сравниваемых изображений; $K = S_{\text{ч}}/N_{\text{ч}}$.

6. Разрешающая способность (абсолютная) различается по всем измеряемым параметрам (например, по линейным и угловой координатам, по дальности и др.). Разрешающая способность по

линейным координатам Δx , Δy и развороту $\Delta \alpha$ – это минимальные смещения и разворот ТИ в рабочей зоне, определяемые ИС с необходимой точностью (нормированной погрешностью). Разрешающая способность по дальности H – минимальное расстояние между ОР и датчиком ТИ, оцениваемое ИС с необходимой точностью.

7. Диапазон показаний – область значений индикаторного (отсчетного) устройства ИУС, ограниченная начальным (например, Δx_{\min} , Δy_{\min} , $\Delta \alpha_{\min}$) и конечным (например, Δx_{\max} , Δy_{\max} , $\Delta \alpha_{\max}$) значениями шкалы (означающих соответственно минимальные и максимальные смещения и развороты ОР в рабочей зоне). Диапазон измерений (диапазон измеряемых величин) – допустимые смещения и развороты в рабочей зоне, для которых нормированы допускаемые погрешности ИУС. Предел измерений – наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

Характеристики чувствительности ИС к влияющим величинам выбирают из числа следующих:

1. Функция влияния – зависимость изменения метрологической характеристики (например, σ_x , σ_y , σ_a , δ_x , δ_y , δ_a) от изменения влияющей величины (например, наличие и значение $N_{\text{ч}}$ из-за неравномерной освещенности сцены или недопустимой взаимной ориентации ОР и датчика ТИ).

2. Изменения значений метрологических характеристик ИУС, вызванные изменениями влияющих величин ($N_{\text{ч}}$ и др.), в установленных пределах.

К динамическим характеристикам ИС относятся следующие характеристики:

1. Полная динамическая характеристика аналоговых ИУС, которая выбирается из известных характеристик (переходная, импульсная переходная, амплитудно-фазовая, амплитудно-частотная, совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик, передаточная функция).

2. Частотные динамические характеристики, к которым относится время реакции t_r , максимальная частота измерений f_{\max} , время измерения параметров $t_{\text{и}}$.

Время реакции t_r – это время установления показаний (для ИУС с показывающей индикацией) или время установления выходного сигнала (для измерительных ИС). Другими словами, время реакции t_r – время, прошедшее с момента скачкообразного изменения

положения (или типа) ОР в рабочей зоне (и одновременной подачи синхросигнала) до момента, начиная с которого показания ИС и его выходного сигнала (кода) отличаются от установившегося показания или сигнала на значение, не превышающее заданного.

Максимальная частота (скорость) измерений f_{\max} – максимальное число n_{\max} измерений в единицу времени t ($f_{\max} = n_{\max}/t$). Быстродействие ИС может также характеризоваться временем измерения. Время измерения (длительность цикла $t_{\text{ц}}$, оценки параметров) – время, прошедшее с момента измерения измеряемой величины до момента регистрации нового результата измерения на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

К метрологическим характеристикам ИУС относятся также информативные параметры выходного сигнала – параметры выходного сигнала, не используемые для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала или не являющиеся выходной величиной меры [1].

К неинформативным параметрам выходного сигнала ИУС относится часть сигнала, соответствующая синхроимпульсу или несущая информацию о помехах (несовпадающих частях изображений).

Важной метрологической характеристикой является объем хранимой эталонной и текущей информации. Объем хранимой эталонной (или текущей) информации – количество запоминаемой информации I , необходимой для выполнения с заданной точностью и быстродействием требуемой работы ИУС. Косвенной характеристикой I является число $N_{\text{э}}$ запоминаемых кадров ЭИ. При этом необходимо учитывать способность ИС к обучению. Обучаемость – возможность многократного программного или аппаратного получения набора параметров (данных) об объектах измерения (контроля). При этом время обучения есть время подготовки ИУС к работе.

Важной метрологической характеристикой ИС является область рабочих частот – полоса частот, в пределах которой точность работы ИС, вызванная изменением частоты, не превышает допустимого предела.

При использовании в качестве датчика ТИ телевизионной камеры необходимо оценить ее чувствительность (спектральную, интегральную) и динамический диапазон.

4.4. Погрешности информационных устройств и систем

4.4.1. Общие сведения о погрешностях измерений

Кратко рассмотрим погрешности измерений [4].

Разность между найденным значением измеряемой величины A и её действительным значением B называется абсолютной погрешностью измерения:

$$\Delta = A - B.$$

Величина абсолютной погрешности, взятая с обратным знаком, называется поправкой

$$C = B - A.$$

Относительной погрешностью измерения называется отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta}{B} = \frac{A - B}{B} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{A - B}{B} \cdot 100 \%$$

Погрешности разделяются на три класса: систематические, случайные, промахи.

Систематические погрешности в процессе измерения остаются постоянными или подчиняются закону.

Случайные погрешности – это погрешности, переменные по величине и знаку. Их изменение не подчиняется какой-либо закономерности.

Промахи – это погрешности, которые резко искажают результат измерения. К ним относятся: неверный отсчёт показаний измерительных приборов, неправильная запись наблюдений.

Среднеарифметическое значение измеряемой величины:

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}.$$

Среднеквадратическое значение измеряемой величины

$$\sigma = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}{n}}.$$

Математические ожидания дискретной и непрерывной величины определяются соответствующими выражениями:

$$M_N(X) = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n}{N} = X_1 \frac{m_1}{N} + X_2 \frac{m_2}{N} + \dots + X_n \frac{m_n}{N};$$

$$M(X) = X_1p(X_1) + X_2p(X_2) + \dots + X_np(X_n),$$

$$M(X) = \sum_{i=1}^n X_i p(X_i),$$

где m_n – число значений измеряемой величины; X_n – случайная величина; N – число измерений; P – вероятность появления i -й величины.

Дисперсия непрерывной величины

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i.$$

Дисперсия дискретной величины

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 W(x) dx.$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}.$$

4.4.2. Виды распределений случайных величин

4.4.2.1. Равномерное распределение

Непрерывная случайная величина x имеет равномерное распределение на отрезке $[a, b]$, если на этом отрезке плотность распределения случайной величины постоянна, а вне его равна нулю. Плотность равномерного распределения имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x > b. \end{cases}$$

Интегральной функция распределения для этого закона будет в следующем виде:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x > b. \end{cases}$$

Изобразим графики $f(x)$ и $F(x)$ (рис. 4.1).

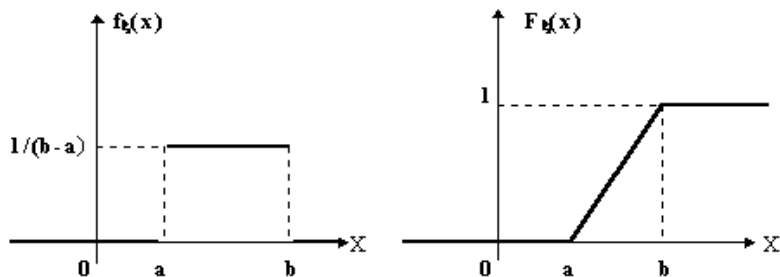


Рис. 4.1. Плотность равномерного распределения и интегральная функция распределения случайной величины

Наконец, найдем вероятность попадания значений равномерно распределенной случайной величины на интервале (a, b) в интервал (α, β) :

$$P(\alpha < X < \beta) = \frac{\beta - \alpha}{b - a}.$$

Непрерывная случайная величина подчинена равномерному закону распределения, если ее возможные значения лежат в пределах некоторого определенного интервала, кроме того, в пределах этого интервала все значения случайной величины одинаково вероятны (обладают одной и той же плотностью вероятности). С такими случайными величинами часто встречаются в измерительной практике при округлении отсчетов измерительных приборов до целых делений шкал. Ошибка при округлении отсчета до ближайшего целого деления является случайной величиной X , которая с постоянной плотностью вероятности принимает любое значение между соседними целыми делениями.

4.4.2.2. Нормальное распределение

Исключительно важную роль в теории вероятностей играет нормальное распределение (закон Гаусса).

Непрерывная случайная величина x имеет нормальное распределение вероятностей с параметрами a , $\sigma > 0$, если плотность распределения ее имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

Нормальный закон распределения широко применяется в практических задачах, он проявляется во всех случаях, когда случайная величина является результатом действия большого числа различных факторов. Каждый фактор в отдельности на величину x влияет незначительно.

Функция распределения такой случайной величины имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt.$$

График плотности вероятности имеет вид нормальной кривой (Гаусса) и представлен на рис. 4.2.

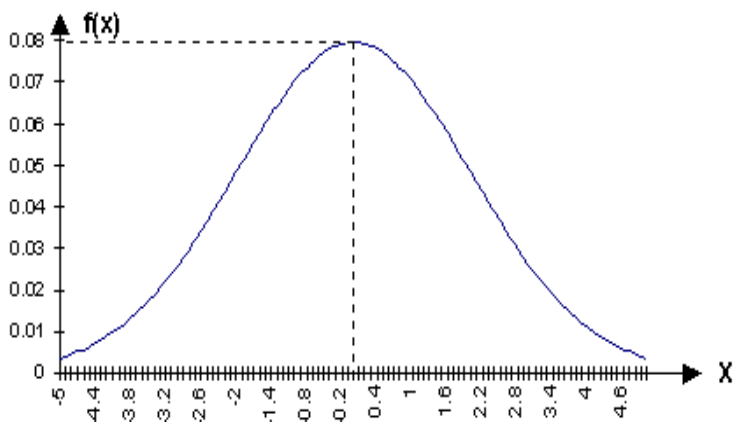


Рис. 4.2. График плотности вероятности для нормального распределения

Отметим некоторые свойства нормальной кривой.

1. Кривая распределения симметрична относительно прямой $x = a$.

$$2. \max_x f(x) = f(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

$$3. \lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = 0.$$

4. При изменении математического ожидания и при $\sigma = \text{const}$ происходит смещение кривой вдоль оси Ox . Если положить $a = \text{const}$ и изменять σ , то кривая изменяет свой вид в зависимости от σ .

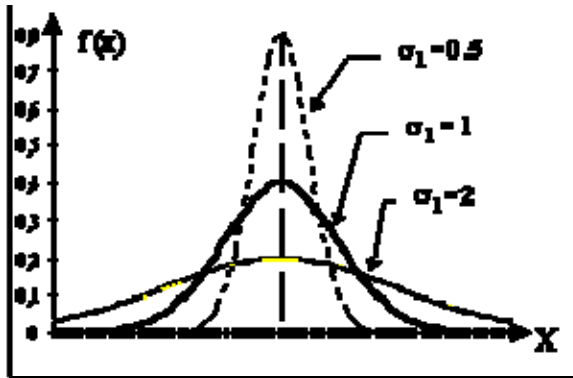


Рис. 4.3. Вид кривой $f(x)$ в зависимости от σ

Замечание. Пусть X – нормальная случайная величина с параметрами $(0,1)$. Тогда ее плотность имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}},$$

а функция распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

есть функция Лапласа.

С помощью $F(x)$ можно вычислять вероятность того, что нормальная случайная величина с параметрами (a, σ^2) примет значение из интервала (α, β) .

Именно

$$P(\alpha < X < \beta) = F\left(\frac{\beta - a}{\sigma}\right) - F\left(\frac{\alpha - a}{\sigma}\right).$$

4.4.2.3. Экспоненциальное распределение

В практических приложениях теории вероятностей, особенно в теории массового обслуживания, исследовании операций, в физике, биологии, теории надежности, часто имеют дело со случайными величинами, которые имеют экспоненциальное распределение.

Случайная величина X распределена по показательному закону с параметром $\lambda > 0$, если она непрерывна и имеет следующую плотность распределения вероятностей:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Тогда

$$F(x) = \lambda \int_0^x e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda x} \quad (x > 0).$$

Таким образом, $P(\alpha < X < \beta) = F\left(\frac{\beta - \alpha}{b - a}\right)$, соответственно графики $f(x)$ и $F(x)$ имеют вид, как на рис. 4.4.

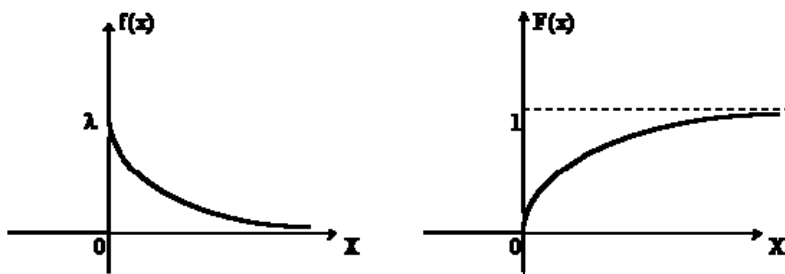


Рис. 4.4. Виды функций $f(x)$ и $F(x)$ для экспоненциального распределения

4.4.3. Классификация погрешностей

Классификация возможных погрешностей ИУС представлена на рис. 4.5. При классификации погрешностей используем следующие основания: закономерность, характер взаимодействия объекта распознавания с внешней средой и ИУС, компоненты системы. Дадим краткую характеристику основных видов погрешностей.

Методические погрешности ИУС – это погрешности, обусловленные особенностями реализованного алгоритма работы системы, различными аппроксимациями, округлениями, неучетами различных факторов, влияющих на результат измерения. Субъективными называют погрешности, зависящие от личности экспериментатора, опыта и аккуратности его работы при измерениях и фиксации их результатов. Субъективные погрешности возникают чаще всего при съеме информации со стрелочных или цифровых приборов и при невозможности автоматической фиксации результатов измерений.

Внешние погрешности – это ошибки, связанные с влиянием на ИУС внешней среды – изменение освещенности сцены с ОР, изменение взаимной ориентации ОР и датчика ТИ, вибрации, электрические помехи и другие отклонения окружающей среды от «нормальных» условий, при которых осуществлялась калибровка (градуировка) ИУС.

Энергетическая составляющая погрешности измерений обусловлена потреблением ИУС мощности от исследуемого объекта. Энергетическая составляющая мощности может также возникать при передаче мощности исследуемому объекту от ИУС; например, из-за изменения цвета ОР, освещаемого внешним источником цвета.

Типичными для ИУС являются четыре следующие составляющие инструментальной погрешности измерений:

1. Погрешность, обусловленная неидеальностью собственных свойств системы, т.е. отличием действительного значения выходной меры в нормальных условиях от номинального значения этой величины, обусловленная отличием действительной корреляционной функции в нормальных условиях от номинальной функции. Эта составляющая называется основной погрешностью.

2. Погрешность, обусловленная реакцией системы на изменения влияющих величин и неинформативных параметров выходного сиг-

нала относительно их нормальных значений. Эта составляющая называется дополнительной погрешностью.

3. Погрешность, обусловленная реакцией ИУС на скорость (частоту) изменения выходного сигнала (характеризующего, например, скорость изменения положения ОР). Эта составляющая называется динамической погрешностью.

4. Погрешность, обусловленная взаимодействием ИУС и объекта измерения.

Следует различать погрешность ИУС в динамическом режиме и динамическую погрешность. В первом случае понимают погрешность ИУС, возникающую при изменении характеристик (очертание контура, цвета) и положения ОР (при его движении). Во втором случае – разность между погрешностью ИУС в динамическом режиме и его статистической погрешностью.

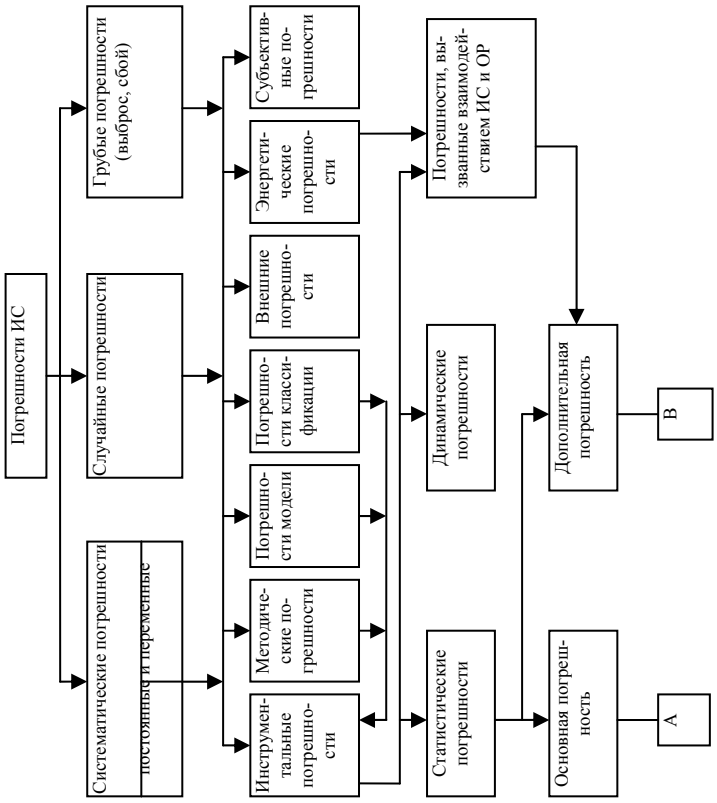
Инструментальные погрешности определяются по-разному для аналоговой (аналого-цифровой) и цифровой ИУС. ИУС аналогового (например, с оптическими блоками анализа изображений) типа обусловлена погрешностями работы основных устройств: ДТИ, накопителя ТИ, анализатора изображений, блока памяти, блоков адаптации и освещения. Погрешности ДТИ вызваны следующими факторами: 1) ошибками установки (размещения) или наведения ДТИ на объект; 2) нелинейностями разверток и видеоусилителя; 3) изменением масштаба ТИ; 4) конечной разрешающей способностью фотоприёмника.

Погрешности оптических анализаторов изображений вызваны аберрациями и астигматизмом.

Погрешности анализатора изображений вызваны следующими факторами: 1) конечной разрешающей способностью фотоприемника; 2) нелинейностью разверток и видеоусилителя; 3) внутренних шумов.

Погрешности, обусловленные качеством работы блока памяти определяются погрешностью его узлов.

Погрешности блока адаптации обусловлены, прежде всего, качеством реализации алгоритмов подстройки параметров ИУС, а погрешности блока освещения – качеством реализации алгоритмов создания необходимого освещения (очередность включения светиль-



Законмерность
проявления

Причины
возникновения

Характер
взаимодействия
со средой и ИС

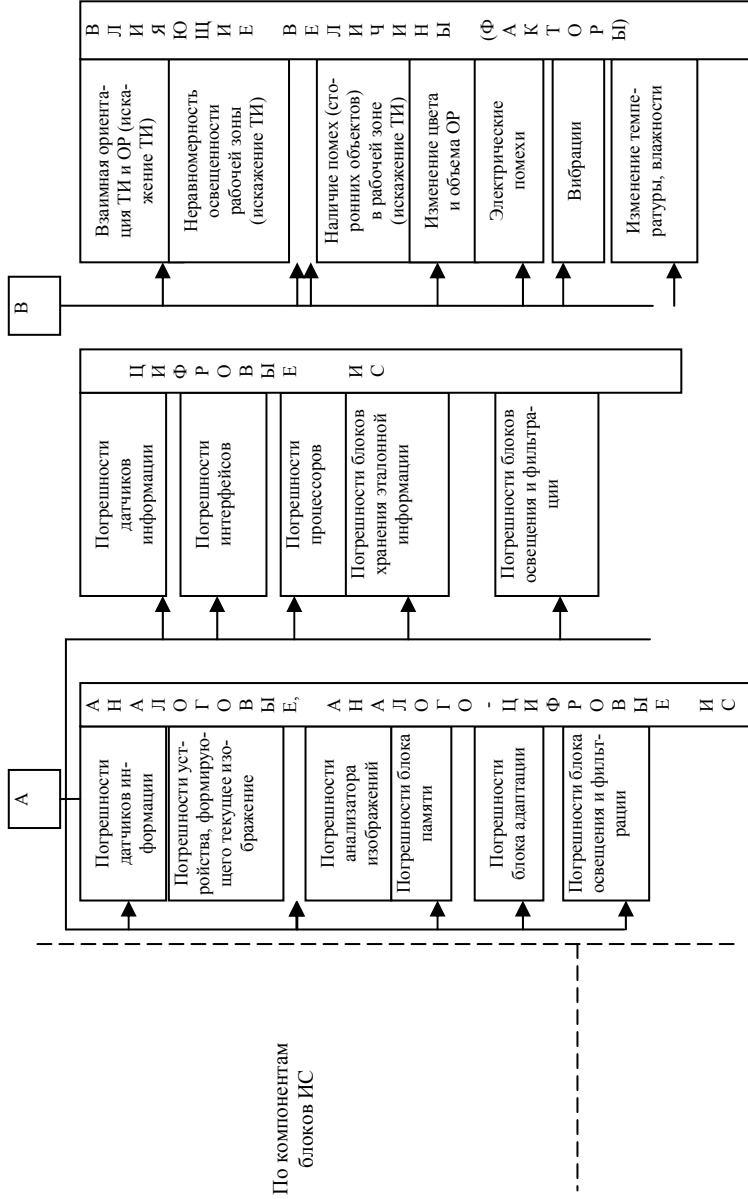


Рис. 4.5. Классификация погрешностей ИИС

ников, сила света, требуемая цветность освещения, своевременность установления световолоконных элементов и др.).

Погрешности цифровых ИУС вызваны ошибками работы следующих блоков зрительной системы: погрешностью датчика ТИ, погрешностью интерфейсов, погрешностью процессоров, погрешностью блока хранения эталонной информации и погрешностью блока освещения и фильтрации.

Погрешность датчика ТИ цифровых ИУС определяется аналогично погрешностям датчика ТИИС аналогового типа.

Погрешность интерфейса (буферного ЗУ (БЗУ) для запоминания ТИ) обусловлена ошибками оцифровывания и записи ТИ в память БЗУ из-за ошибки работы АЦП (при использовании полутоновой обработки изображений), ЦАП, синхронизатора, блока связи и блока связи с микроЭВМ.

Погрешности процессоров вызваны в основном методическими ошибками и сбоями в их работе. Аналогично характеризуются ошибками, как и погрешности процессоров, блоки хранения эталонной информации.

4.4.4. Оценка статистических характеристик погрешностей ИУС

Определим статистические характеристики погрешностей ИУС на примере зрительной системы робота. Для простоты рассмотрим определение статистических характеристик погрешности оценки трех искомых параметров ОР – линейных и угловой координат Δx , Δy , $\Delta \alpha$ в рабочей зоне. Оценка $\Delta \hat{M}_x, \Delta \hat{M}_y, \Delta \hat{M}_\alpha$ математического ожидания (среднего значения) $\Delta M_x, \Delta M_y, \Delta M_\alpha$ систематической составляющей погрешности КСТЗ определяется следующими хорошо известными формулами:

$$\Delta \hat{M}_x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta \hat{x}_i,$$

$$\Delta \hat{M}_y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta \hat{y}_i,$$

$$\Delta \hat{M}_\alpha = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta \hat{\alpha}_i,$$

где m – число ИУС или число отсчетов измерений; $\Delta \hat{x}_i, \Delta \hat{y}_i, \Delta \hat{\alpha}_i$ – значения измеряемых параметров ОМ для i -го экземпляра ИС или i -го эксперимента.

Оценка $\hat{\sigma}_x^\delta, \hat{\sigma}_y^\delta, \hat{\sigma}_\alpha^\delta$ среднеквадратического отклонения $\sigma_x^\delta, \sigma_y^\delta, \sigma_\alpha^\delta$ систематической составляющей погрешности ИУС находится следующим образом:

$$\hat{\sigma}_x^\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta \hat{x}_i - \Delta \hat{M}_x)^2}{m-1}}, \quad \hat{\sigma}_y^\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta \hat{y}_i - \Delta \hat{M}_y)^2}{m-1}},$$

$$\hat{\sigma}_\alpha^\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta \hat{\alpha}_i - \Delta \hat{M}_\alpha)^2}{m-1}}.$$

Оценка СКО случайной составляющей погрешности конкретного экземпляра КСТЗ, обладающего вариацией, определяется следующими формулами:

:

$$\hat{\sigma}_x^B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta'_{ix} - \Delta'_x)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_{ix} - \Delta''_x)^2}{2n-1}},$$

$$\sigma_y^B = \sqrt{\frac{\sum_{n-1}^m (\Delta'_y - \Delta'_y)^2 + \sum_{i-1}^n (\Delta''_y - \Delta''_y)^2}{2n-1}}, \quad (4.1)$$

$$\hat{\sigma}_\alpha^B = \sqrt{\frac{\sum_{i-1}^n (\Delta'_{i\alpha} - \Delta'_{i\alpha})^2 + \sum_{i-1}^n (\Delta''_{i\alpha} - \Delta''_{i\alpha})^2}{2n-1}},$$

где n – число реализаций погрешности измеряемого параметра при определении $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha$ или $\bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$; $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha$ и $\bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$ – средние значения погрешности в точке $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i\}$ диапазона измерения ИС, полученные экспериментально при медленных непрерывных изменениях положения ОР в рабочей зоне со стороны меньших (для $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha$) и больших (для $\bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$) значений до значения $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i\}$; $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha$ и $\bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$ – i -е реализации отсчетов погрешностей Δ' и Δ'' , полученные экспериментально при изменении информативного параметра (положения ОМ) со стороны меньших (для $\Delta'_{xi}, \Delta'_{yi}, \Delta'_{\alpha i}$) и больших (для $\Delta''_{xi}, \Delta''_{yi}, \Delta''_{\alpha i}$) значений до значения $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i\}$.

Вариация выходного сигнала ИУС характеризует гистерезис в показаниях системы и определяется как разность двух оценок математических ожиданий информативного параметра выходного сигнала, несущего информацию о координатах объекта, получающихся при измерениях величины, имеющей одно и то же значение с плавным (медленным) подходом к этому значению со стороны меньших и больших значений.

Если вариацию не учитывать, то выражения (4.1) запишутся в виде

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (\Delta_{ix} - \hat{\delta}_x)^2}{2n-1}},$$

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (\Delta_{iy} - \hat{\delta}_y)^2}{2n-1}},$$

$$\hat{\sigma}_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (\Delta_{i\alpha} - \hat{\delta}_\alpha)^2}{2n-1}},$$

где $\Delta_{ix}, \Delta_{iy}, \Delta_{i\alpha}$ – i -е измерение (отсчет) погрешности; $\hat{\delta}_x, \hat{\delta}_y, \hat{\delta}_\alpha$ – оценки систематических составляющих погрешности $\delta_x, \delta_y, \delta_\alpha$ конкретного экземпляра ИУС.

Значения $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha, \bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$ в формулах (4.1) находятся следующим образом:

$$\bar{\Delta}'_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{ix}, \quad \bar{\Delta}''_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{ix},$$

$$\bar{\Delta}'_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{iy}, \quad \bar{\Delta}''_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{iy},$$

$$\bar{\Delta}'_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{i\alpha}, \quad \bar{\Delta}''_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{i\alpha}. \quad (4.2)$$

При этом оценки систематической составляющей погрешности

конкретного экземпляра ИС, обладающего вариацией в точке $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i\}$ диапазона измерений, определяются формулами

$$\begin{aligned}\hat{\delta}_x^B &= \frac{\bar{\Delta}'_x + \bar{\Delta}''_x}{2}, \\ \hat{\delta}_y^B &= \frac{\bar{\Delta}'_y + \bar{\Delta}''_y}{2}, \\ \hat{\delta}_\alpha^B &= \frac{\bar{\Delta}'_\alpha + \bar{\Delta}''_\alpha}{2}.\end{aligned}\quad (4.3)$$

Если вариация отсутствует, то данные оценки определяются выражениями

$$\begin{aligned}\delta_x &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{ix}, \\ \delta_y &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{iy}, \\ \delta_\alpha &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{i\alpha}.\end{aligned}\quad (4.4)$$

Суммарная погрешность КСТЗ при независимости ее случайных составляющих равна

$$\Delta_x^\Sigma = \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{xi} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{xi}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{xi}^2},$$

$$\Delta_y^\Sigma = \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{yi} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{yi}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{yi}^2},$$

$$\Delta_\alpha^\Sigma = \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{\alpha i} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{\alpha i}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{\alpha i}^2}, \quad (4.5)$$

где $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{\alpha i}$ – i -я постоянная систематическая погрешность определения $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i$; n_c – число постоянных систематических погрешностей; $\delta_{xi}^n, \delta_{yi}^n, \delta_{\alpha i}^n$ – предельное значение i -й переменной систематической составляющей погрешности оценки $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i$; m_p – число переменных систематических погрешностей; $\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{\alpha i}$ – СКО i -й случайной составляющей погрешности оценки $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i$; p_C – число случайных составляющих; K_i – коэффициент, учитывающий переход от СКО случайной составляющей погрешности к предельной погрешности u .

Доверительная вероятность p^I для погрешности Δ'_Σ определяется по результирующей функции распределения частных систематических и случайных погрешностей ИС, которая находится как композиция распределения упомянутых частных погрешностей [1]:

$$p^I = \frac{\int_{-\infty}^V h_\Sigma(z) dz}{\int_{-\infty}^{\infty} h_\Sigma(z) dz},$$

где $h_\Sigma(z) = \int_{z_1}^{z_2} h_1 h_2 dz_2$ – результирующее распределение погрешностей $\Delta x, \Delta y$, плотности распределения которых выражаются

уравнениями $h'_1 = \varphi(x)$, $h'_2 = \varphi(y)$; z – вспомогательная переменная, введенная так, что $x = f + z$, $y = -cz$, а $f = x + y$, $c = \pm 1$.

В [1, 2] приведены примеры суммирования различных частных погрешностей, имеющих место при расчете и проектировании высокочастотных угловых преобразователей. Этот подход можно применять для расчета и проектирования ИС. Рассмотрим определение инструментальной составляющей ИС. Данная погрешность измерений состоит из основной, дополнительной и динамической погрешностей и погрешности, обусловленной ИС с объектом измерений. Так как эта составляющая погрешности измерений является случайной величиной, то определить ее – значит найти интервал, в котором с заданной вероятностью P_o находится погрешность. Этот интервал можно оценивать в три этапа [2]:

1) определение математического ожидания $\Delta M_{xi}, \Delta M_{yi}, \Delta M_{\alpha i}$ и дисперсии $D_{xi}, D_{yi}, D_{\alpha i}$ каждой из четырех составляющих инструментальной погрешности;

2) определение математического ожидания $M_{xinstr}, M_{yinstr}, M_{\alpha instr}$ и дисперсии $D_{xinstr}, D_{yinstr}, D_{\alpha instr}$ инструментальной составляющей погрешности измерений:

$$M_{xinstr} = \sum_{i=1}^4 M_{xi}, \quad M_{yinstr} = \sum_{i=1}^4 M_{yi}, \quad M_{\alpha instr} = \sum_{i=1}^4 M_{\alpha i},$$

$$D_{xinstr} = \sum_{i=1}^4 D_{xi}, \quad D_{yinstr} = \sum_{i=1}^4 D_{yi}, \quad D_{\alpha instr} = \sum_{i=1}^4 D_{\alpha i}; \quad (4.6)$$

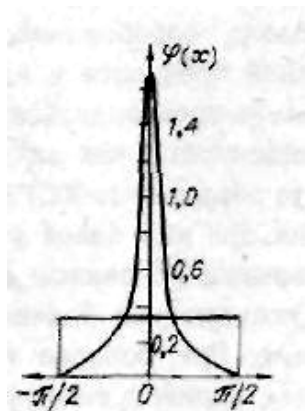


Рис. 4.6. Плотность распределения вероятностей погрешностей

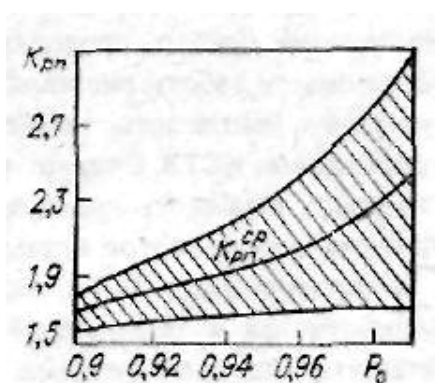


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента $K_{p\Pi}$ от вероятности P_0

3) оценка интервала, в котором с вероятностью P_0 лежит инструментальная составляющая погрешности измерений:

$$M_{xinstr} - K_{p\Pi}\sigma_{xinstr} \leq \Delta_{xinstr} \leq M_{xinstr} + K_{p\Pi}\sigma_{xinstr},$$

$$M_{yinstr} - K_{p\Pi}\sigma_{yinstr} \leq \Delta_{yinstr} \leq M_{yinstr} + K_{p\Pi}\sigma_{yinstr},$$

$$M_{\alpha instr} - K_{p\Pi}\sigma_{\alpha instr} \leq \Delta_{\alpha instr} \leq M_{\alpha instr} + K_{p\Pi}\sigma_{\alpha instr},$$

где

$$\sigma_{xinstr} = +\sqrt{D_{xinstr}}, \quad \sigma_{yinstr} = +\sqrt{D_{yinstr}}, \quad \sigma_{\alpha instr} = +\sqrt{D_{\alpha instr}};$$

$K_{p\Pi}$ – коэффициент, зависящий от вида закона распределения погрешности и от заданной вероятности P_0 . Для выбора коэффициента $K_{p\Pi}$ необходимо знать вид закона распределения погрешности $\Delta_{xinstr}, \Delta_{yinstr}, \Delta_{\alpha instr}$. Например, известно, что при нормальном законе распределения погрешности $K_{p\Pi} = 3$ при $P_0 = 0,997$. Если допустима приближенная оценка искомого интервала, то, полагая,

что плотность распределения вероятностей погрешностей $\Delta_{xinstr}, \Delta_{yinstr}, \Delta_{ainstr}$ – усеченная, одномодальная, симметричная функция, находящаяся в широкой области плотностей распределения от равномерной до весьма острой, можно выбрать среднее значение коэффициента $K_{p\Pi}$ по графику, приведенному на рис. 4.6 [2]. Этот график показывает зависимость от вероятности P_0 среднего значения (K_{cp}) коэффициента $K_{p\Pi}$ для данной группы плотностей распределения. На рис. 4.7 заштрихована область возможных действительных функций зависимости $K_{p\Pi}$ от P_0 . При увеличении вероятности отклонения границ этой области $K_{p\Pi}^{cp}$ возрастает, так что при $P_0 = 0,95$ погрешность коэффициента $K_{p\Pi}$ в границах $\pm 16\%$, а при $P_0 = 0,99$ – в границах $\pm 30\%$. Статистические характеристики составляющих инструментальной погрешности зависят от реализации и условий эксплуатации ИС.

4.5. Метрология программного обеспечения информационных устройств и систем

Качество ПО – это понятие, аккумулирующее противоречие природы самих программ и противоречие, возникающее при их создании, модификации, эксплуатации.

Свойства программы – это её объективные особенности, проявляющиеся при её разработке, эксплуатации и (или) сопровождении.

Показатель качества программы – это понятие, определяющее определённую часть свойств программы и поддающееся интуитивной оценке.

Характеристика качества программы – это понятие, отражающее отдельные факторы (свойства), влияющие на качество программы и поддающиеся измерению.

Критерий качества – это численный показатель, характеризующий степень, в которой программе присущи оцениваемые свойства.

Критерий качества – это численный показатель, взвешенно оценивающий ряд свойств программ.

Объективно оценить качество ПО в процессе эксплуатации мо-

жет только пользователь, с другой стороны, обеспечить необходимый уровень качества разработки ПО может только разработчик. Реальное качество ПО находится на стыке этих двух оценок.

4.5.1. Классификация критерия качества программного обеспечения

Критерии качества представляют собой измеряемые численные показатели в виде некоторой целевой функции, характеризующие степень выполнения программами своего назначения.

Выделяется некоторый превалирующий показатель для оценки качества системы, к которому предъявляются следующие основные требования:

1. Критерий должен численно характеризовать степень выполнения основной целевой функции системы, наиболее важной для данного этапа анализа или синтеза.

2. Критерий должен обеспечивать возможность определения затрат, необходимых для достижения его различных значений, а также степени влияния на показатель качества различных внешних факторов и параметров.

3. Критерий должен быть по возможности простым по содержанию, хорошо измеряемым и иметь малую дисперсию, т.е. слабо зависеть от множества неконтролируемых факторов.

Применение метрик – числовых оценок параметров к комплексам программ позволяет упорядочить их разработку, испытания, эксплуатацию и сопровождение.

Функциональные критерии отражают основную специфику применения и степень соответствия программ их целевому назначению.

Конструктивные критерии качества программ достаточно инвариантны к их целевому назначению и основным функциям. К ним относятся сложность программ, надежность функционирования, используемые ресурсы ЭВМ, корректность и т.д. В свою очередь конструктивные характеристики комплексов программ целесообразно разделить на основные критерии (показатели) качества и факторы или параметры, влияющие на их значения (рис. 4.8).

Критерии качества этапа проектирования включают, прежде всего, сложность создания комплекса программ и проверки его адекватности поставленным целям. На этапе проектирования основные

затраты составляет трудоемкость создания программ заданной сложности и корректности.

Надежность (безотказность) функционирования характеризует относительную длительность получения корректных (достоверных) результатов или вероятность правильных (не искаженных за допустимые пределы) выходных данных.

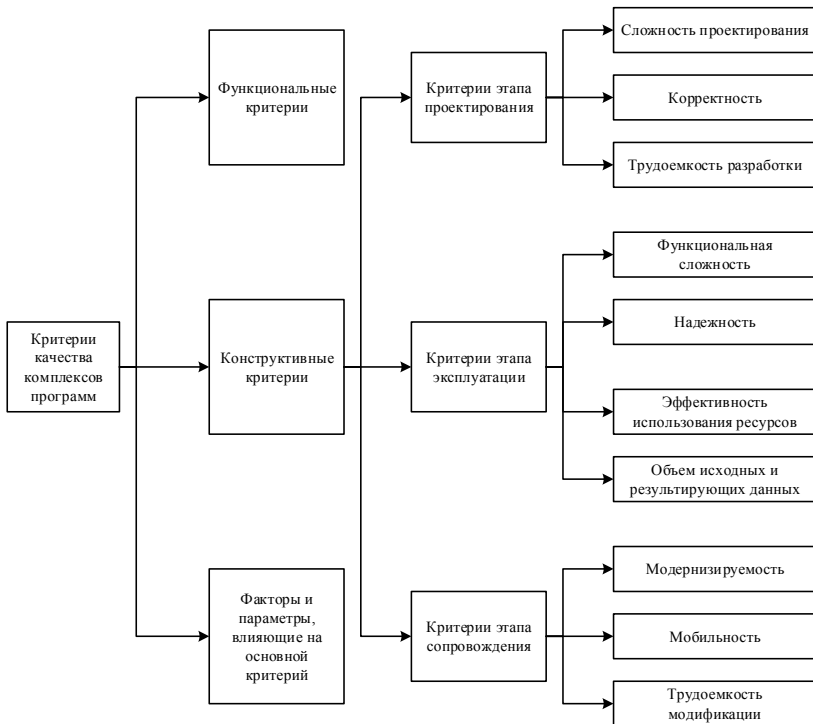


Рис. 4.8. Схема взаимодействия основных критериев качества программ

Способность к модернизации комплексов программ определяется четкостью их структурного построения и структурой межмодульных связей. Кроме того, на этот критерий влияют метод распределения ресурсов ВС и наличие резервов для развития программ.

Мобильность комплексов программ относительно изменения ти-

па, структуры и системы команд вычислительной машины характеризует возможность сохранения и эффективного использования эксплуатируемых программ в процессе развития аппаратуры ЭВМ.

Временные показатели жизненного цикла программ: длительность проектирования, продолжительность эксплуатации очередной версии и длительность проведения каждой модификации.

4.5.2. Основные требования и критерии качества программного обеспечения

Критерий должен:

1. Численно характеризовать основную целевую функцию программы.

2. Обеспечивать возможность определения затрат (не только денежных), необходимых для достижения требуемого уровня качества, а также степени влияния на показатель качества различных внешних факторов.

3. Быть по возможности простым, хорошо измеримым и иметь малую дисперсию.

Примеры критериев: сложность, корректность, надёжность, трудоёмкость.

Примеры свойств: число строк программы, количество точек входа, время подготовки исходных данных, общее время работы, время выдачи выходных результатов, количество разработчиков.

4.5.3. Связь критериев и характеристик программного обеспечения

1. Гибкость: модульность, расширяемость, общность, способность к самоописанию.

2. Лёгкость применения: управляемость, объём ввода-вывода, изучаемость, коммуникативность.

3. Лёгкость сопровождения: модульность, компактность, простота, согласованность, способность к самоописанию.

4. Надёжность: устойчивость к ошибкам, точность, простота, согласованность.

5. Тестируемость: простота, модульность, оснащённость средствами, способность к самоописанию.

6. Эффективность: по времени, по памяти.
7. Корректность: прослеживаемость, согласованность, функциональная полнота.
8. Целостность: контроль доступа, регистрация доступа.
9. Мобильность: модульность, машинезависимость, общность.
10. Совместимость: модульность, совместимость языка и инструментальных средств, обобщённость представления данных.

4.5.4. Сложность. Оценка предела возможностей вычисления способом Бреммермана

Не существует системы обработки данных, искусственной или естественной, которая могла бы обрабатывать более чем $2 \cdot 10^{47}$ бит/с на грамм своей массы. Это число называется пределом Бреммермана.

E – количество энергии, которое у нас есть.

Кодирование – распределение по нескольким уровням с шагом ΔE .

N – число уровней, $N = \frac{E}{\Delta E}$, тогда максимальное число битов $\log_2(N + 1)$, если вместо одного маркёра на интервале $[0, E]$ использовать K маркёров одновременно:

$$2 \leq k \leq N, \text{ то } k \cdot \log_2\left(1 + \frac{N}{K}\right) \text{ бит.}$$

Маркёр – способ проявления конкретной кодировки, определяется

$$K = N,$$

где $N \log_2(1+1) = N$ бит информации.

Наименьший вариант ΔE даётся принципом неопределённости Гейзенберга и определяется выражением

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h \cdot N,$$

где ΔE – величина энергии; Δt – время разбиения; h – постоянная Планка; $N \leq (E \cdot \Delta t)/h$; $N = 1,36 \cdot m \cdot \Delta t \cdot 1047$; $\Delta t = 1$ с; $m = 12$; $N = 1,36 \cdot 1047 < 2 \cdot 1047$

Трансвычислительные задачи.

Трансвычислительными задачами называются задачи, нерешаемые в настоящее время, т.е.

$$N = 1,36 \cdot m \cdot \Delta t \cdot 1047;$$

$$m = 6 \cdot 1027 \text{ г} - \text{масса Земли};$$

$$\Delta t = 3,14 \cdot 1017 \text{ с};$$

$N = 25,6 \cdot 1092 \approx 1093$ бит – предел реализуемых вычислений по Бреммерману.

4.5.5. Метрики качества программ

Известно шесть направлений развития метрик:

1. Оценка топологической и информационной сложности программного средства.
2. Оценка надёжности ПС, позволяющая прогнозировать отказы.
3. Оценка производительности ПО.
4. Оценка уровня языковых средств и их применения.
5. Оценка трудности восприятия и понимания программных текстов, существенной для сопровождения и модификации.
6. Оценка производительности труда программиста для прогнозирования сроков и этапов разработки программ.

Метрика сложности

Известны три метрики сложности:

- 1) метрики размера;
- 2) метрики сложности потоков управления программы;
- 3) метрики сложности потоков данных программы.

Метрика размера – число строк – эта метрика действует, когда в одной строке один оператор.

Метрика Холстеда

Эта метрика характеризуется следующими параметрами:

η_1 – число уникальных, различных операторов программы, включая символы-разделители, знаки операций, имена процедур и функций (словарь операций);

η_2 – число уникальных, различных операндов программы (словарь операндов);

$\eta = \eta_1 + \eta_2$ – словарь модуля;

N_1 – общее количество операторов в программе;

N_2 – общее количество операторов в программе.

Информационная длина программ модуля: $N = \eta_1 \log_2 \eta_1 + \eta_2 \log_2 \eta_2$.

Информационный объём модуля: $V = N \log_2 \eta$.

Уровень записи модуля: $L = \frac{2\eta_2}{\eta_1 \cdot N_2}$,

где L – уровень концентрированности вычислений.

Сложность модуля по Холстеду: $E = V/L$, $E = \frac{N \log_2 \eta \cdot \eta_1 \cdot N_2}{2\eta_2}$.

Метрика сложности потока управления программ

С помощью этих метрик оперируют либо плотностью управляющих переходов внутри программы, либо взаимосвязями этих переходов. Используется представление программы в виде следующего графа:

$G(V, E)$ – граф, где V – вершины, которые соответствуют операторам; E – дуги, которые соответствуют переходам.

Метрика числа точек пересечения

Эта метрика ориентирована на оценку ПО, реализованного на слабоструктурированных языках типа Ассемблер. Компоненты оценки базируются на количестве и расположении переходов (условных, безусловных, циклических).

Возможные случаи:

- 1) безусловный – безусловный;
- 2) условный – безусловный;
- 3) условный – условный;
- 4) циклический – условный;
- 5) циклический – безусловный;

Метрика использования языков программирования и медицинских средств и др.

Метрика Холстеда использования языка программирования.

Если есть L и V , то уровень языка $\lambda = L \cdot V$ (табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4.1

Значение метрики Холстеда для различных языков программирования

Язык	Среднее λ	Абсолютное отклонение от среднего
Английский	2,16	0,74
PL	1,53	0,92
Фортран	1,14	0,81
Ассемблер	0,88	0,42

Метрика стилистики и понятности программ

Метрика № 1: оценки уровня комментируемости:

$N_{\text{КОММ}}$ – количество строк комментариев;

N – количество строк модуля;

$F = N_{\text{КОММ}} / N$ – оценка уровня комментируемости. $F \geq 0,1$.

Комментарии в тексте модуля неравномерны.

В начальной части их большое число, и в тексте они встречаются в узловых точках, в хвосте модуля повышенное по сравнению с серединой количество комментариев.

Метрика № 2: оценки уровня комментируемости:

$F_i = \text{SIGN}(N_{\text{КОММ}} i / N_i - 0,1)$.

Общая оценка $F = \sum_i F_i$, где $F \sim n$ даёт хороший результат.

Метрика количества ошибок Холстеда

$B = \frac{N}{3000}$, N – число строк программы;

B – количество ошибок, сохраняющиеся в программе после окончания её обработки компилятором.

Метрика дефектов программы Декесенко

Дефект программы – это такое искажение текста программы, по сравнению с эталонной, которое не учитывается при компиляции, но существенно влияет на исход выполнения программы.

Дефект программы может быть и не обнаружен при выполнении программы на определённом множестве исходных данных. Характеристики метрики дефектов:

D – множество всех потенциальных дефектов;

d – число дефектов.

Пример. Вводим средства какого-либо статического семантического контроля:

R_1 – количество ошибок в программе, полученное без использования этого средства;

R_2 – количество ошибок в программе, полученное с использованием данного средства;

d_1 – количество дефектов в программе, полученное без использования этого средства;

d_2 – количество дефектов в программе, полученное с использованием данного средства;

$$g = \frac{R_1}{R_2} \approx \frac{d_1}{d_2} - \text{показатель эффективности для КП № 1.}$$

При оценке количества возможных дефектов, возникающих в тексте программы, оцениваются все случаи замены операторов, операндов и типов, приводящие к изменению смысла алгоритма.

Реализуем контроль типов данных:

$$d_{\text{тип}} = d_T + dN_1 + dN_2,$$

где d_T – количество дефектов от возможной замены типов;

N_1 – количество дефектов от возможной замены кодов операндов;

N_2 – количество дефектов от возможной замены кодов операторов;

$$d_{\text{тип}} = T \frac{T(T-1) + N_1(\eta_1 - 1) + N_2(\eta_2 - 1)}{N_1(\eta_1 - T) + N_2(\eta_2 - T)},$$

где $d_{\text{тип}}$ – число типов данных в программе;

N_1 – общее число операторов в программе;

N_2 – общее число операндов в программе;

η_1 – словарь операторов;

η_2 – словарь операндов;

T_B – количество типов данных, контролируемых базовым средством программирования;

T_K – количество типов данных, контролируемых дополнительным и базовым средством семантического контроля.

$$D_{\text{типк}} = \frac{T_K}{T_B} \cdot \frac{T_K(T_K - T_B) + N_1(\eta_1 - T_B) + N_2(\eta_2 - T_B)}{N_1(\eta_1 - T_K) + N_2(\eta_2 - T_K)}.$$

Метрика Тейнера

1. Показатель логической сложности:

N – общее количество операторов;

L_{bool} – общее количество логических операторов;

L_{loop} – показатель сложности циклов;

$$L_{loop} = \sum_{i=1}^Q m_i \omega_i,$$

Q – наивысший уровень вложенности цикла в модуле;

m_i – количество циклов в модуле, имеющих i -й уровень вложенности;

ω_i – весовой множитель, $\omega_i = 4^{i-1} \left(\frac{3}{4^Q - 1} \right)$;

$$\sum_{i=1}^Q \omega_i = 1,$$

L_{if} – показатель сложности условных операторов $L_{if} = \sum_{i=1}^Q n_i \omega_i$;

n_i – количество условных операторов i -го уровня вложенности;

L_{BR} – количество ветвлений в условных операторах 0,001.

Общий показатель логической сложности $L_{\text{ТОТ}} = L_{bool} / N + L_{loop} + L_{IF} + L_{BR}$.

2. Показатель сложности взаимосвязи:

$$CINF = AP + 0,5 \cdot SYS,$$

где AP – количество связей с прикладными программами.

SYS – количество связей с системными программами или утилитами.

3. Показатель сложности вычисления:

$$CC = \frac{L_{RECH}}{N} \cdot \frac{L_{SYS}}{\sum_{\text{по модулям}} L_{RECH}},$$

где L_{RECH} – количество операторов вычислительного характера в конкретном модуле; N – общее количество операторов этого модуля; L_{SYS} – суммарная логическая сложность всех модулей, связанных с данным; $\sum_{\text{по модулям}} L_{RECH}$ – сумма вычислительных операторов по всем модулям.

4. Показатель сложности ввода-вывода

$$C_{IO} = \frac{S_{IO}}{N} \cdot \frac{L_{SYS}}{\sum S_{IO}},$$

где S_{IO} – количество операторов ввода-вывода в конкретном модуле.

5. Удобочитаемость:

$$U_{READ} = \frac{COM}{N},$$

где COM – количество строк комментариев; N – общее количество строк.

6. Общий показатель

$$CGLOB = L_{\text{TOT}} + 0,1CINF + 0,2CC + 0,4CIO - 0,1UREAD.$$

Приведённая метрика имеет коэффициенты корреляции с ранее рассмотренными метриками от 0,6 до 0,9.

4.6. Основные этапы измерительных технологий

В дальнейшем будем различать прямые и косвенные измерения [5].

Прямое измерение (*direct measurement*) – измерение, при котором результат измерения получают непосредственно из опытных данных.

В некоторых случаях прямое измерение величин оказывается невозможным или нецелесообразным. Тогда прибегают к *косвенным измерениям*.

Косвенное измерение – (*indirect measurement*) – определение искомого значения физической величины путем вычислений на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с измеряемой величиной.

Последовательность этапов прямых измерений представлена на рис. 4.9.

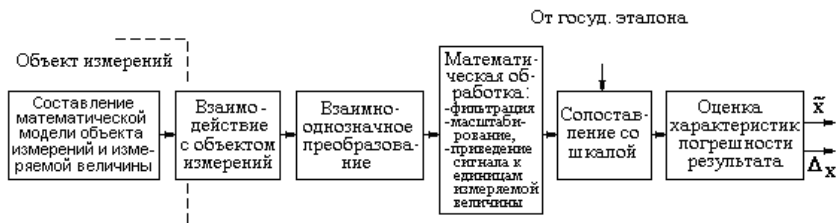


Рис. 4.9. Этапы прямых измерений

Первым этапом перед планированием и выполнением любой измерительной процедуры являются формализация и составление модели объекта измерений и измеряемой величины. Так, перед измерением диаметра стержня необходимо представить его как круглый цилиндр с указанием отклонений от круглости. При измерении температуры воздуха в некотором объеме необходимо представить модель распределения температуры в этом объеме и сформулировать измеряемую температуру как измеряемую величину: среднюю по объему, как минимальную и максимальную или как температуру в какой-либо точке объема.

На следующем этапе организуется взаимодействие измерительного инструмента с объектом измерений. Этот этап является важнейшим в процедуре восприятия информации от объекта. В нем сконцентрирована физическая, информационная и философская сущность измерений как познавательного процесса. Именно здесь сталкиваются две противоположные стороны любого познания: без контакта с объектом познание невозможно, но этот контакт с объектом искажает его, что приводит к потере части информации. Наиболее четкой формализацией такого дуализма является известное из квантовой механики соотношение Гейзенберга между неопределенностью импульса Δp и неопределенностью координаты Δx частицы: $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$, где h – постоянная Планка.

В связи с изложенным это взаимодействие должно быть:

– достаточно «деликатным» по отношению к объекту с тем, чтобы извлечь максимум информации при минимальном искажении объекта,

– избирательным только по отношению к измеряемой величине и нечувствительным по отношению к иным свойствам и параметрам объекта,

– стабильным во времени,

– нечувствительным к внешним мешающим факторам: климатическим, механическим и др.

Сигнал измеряемой величины, воздействующий на чувствительный элемент измерительного инструмента, порождает реакцию этого инструмента в виде сигнала измерительной информации, который должен быть связан с сигналом измеряемой величины взаимно однозначной стабильной функциональной зависимостью.

Сигнал измерительной информации, который получается в результате взаимодействия чувствительной части измерительного инструмента с объектом, обычно подвергается преобразованиям, таким как фильтрация, усиление, ослабление, нелинейному преобразованию, преобразованию в цифровой код с целью получения сигнала, пригодного для дальнейшей математической обработки. Все эти преобразования должны быть взаимно однозначными, стабильными во времени, не зависящими от действия внешних мешающих факторов.

Последующая математическая обработка имеет целью приведение сигнала измерительной информации к размерности измеряемой

величины и к такому размеру, чтобы обеспечить уверенное сопоставление со шкалой измеряемой величины. Эта шкала формируется благодаря выполнению специальной метрологической процедуры, связывающей ее с государственным эталоном, который хранит единицу измеряемой величины.

Обязательным заключительным этапом измерения является формирование и представление результата измерения и характеристик Δ_x погрешности этого результата, т.е. характеристик остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

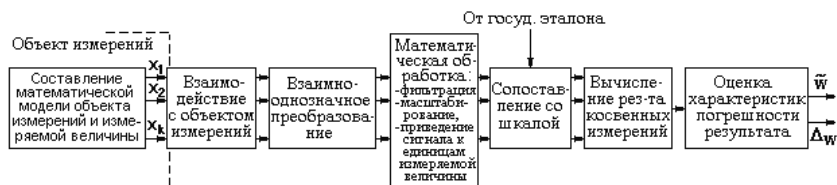


Рис. 4.10. Этапы косвенных измерений

Этапы выполнения косвенных измерений представлены на рис. 4.10. От процедуры прямых измерений эта отличается добавлением этапа вычисления результата косвенного измерения $\tilde{w} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$, где $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$ – результаты прямых измерений. Понятно, что здесь перед планированием и выполнением измерений важно составить более подробную модель объекта измерений, которая должна содержать те самые соотношения между параметрами объекта, которые будут использованы на этапе вычисления результатов косвенных измерений. И здесь в обязательном порядке результат измерения должен сопровождаться сообщением о характеристике погрешности Δ_w .

4.7. Поверка информационных устройств и систем

Рассмотрим вопросы метрологической поверки ИС (на примере ИС роботов). При поверке ИС должны выполняться следующие операции: внешний осмотр, опробование, определение влияния на-

клона на прибор, проверка электрической прочности и изоляции, определение погрешности работы системы. Поверка должна проводиться в нормальных внешних условиях (влажность, температура, освещенность) как для проверяемых (ИС_п), так и для образцовых (ИС_о). Следует учитывать, что ИС_о имеют более высокую точность и область нормальных значений для них более узкая, поэтому условия поверки определяются нормальными внешними условиями именно ИС_о, а не ИС_п. Нормальные (допустимые) значения влияющих величин указываются в технической документации. При поверке ИС следует учитывать, что если ИС комплектуется серийно выпускаемыми изделиями (телекамера, микроЭВМ), то необходимо соблюдать условия поверки, указанные в технической документации на данные изделия.

Поверка ИС производится по двум основным схемам, реализующим метод непосредственного сличения ИС_п и ИС_о (рис. 4.11, *а*, *б*). В первой схеме (рис. 4.11, *а*) ДТИ воспринимает ТИ зоны сканирования (ЗС); видеосигнал с датчика передается через коммутатор (К) на ИС_п и ИС_о. Информация с ИС_п и ИС_о фиксируется на устройствах отображения информации (цифровая печать, осциллограф, телевизор). Во второй схеме (рис. 4.11, *б*) используются два датчика ТИ, а воспринимаемое ТИ расщепляется оптическим коммутатором (ОК) на два изображения. В процессе поверки в зоне сканирования производятся необходимые манипуляции (возмущения, смещения, развороты) с ОР, контролируемые средствами контроля (СК).

Отметим, что для поверки ИС весьма затруднительно использовать метод измерения проверяемым ИС, так как невозможно всю информацию (включая ТИ) передать с образцовой системы к проверяемой.

Метод поверки определяется также типом ИС. Если, например, используются цифровые ИС, то поверку (в комплексе и по блокам) можно производить по схеме, представленной упрощенно на рис. 4.12. На этой схеме не показаны другие узлы ИС. ТИ индицируется сначала на экране первого телевизора (ТВ1) после датчика ТИ, а затем на экране второго телевизора (ТВ2) с выхода БЗУ. Причем ТИ, отображаемое на экране ТВ2, можно выводить на телевизор как с датчика ТИ, так и из ЭВМ. Качество работы БЗУ оценивается визуально оператором (по сличению ТИ на экранах ТВ1 и ТВ2).

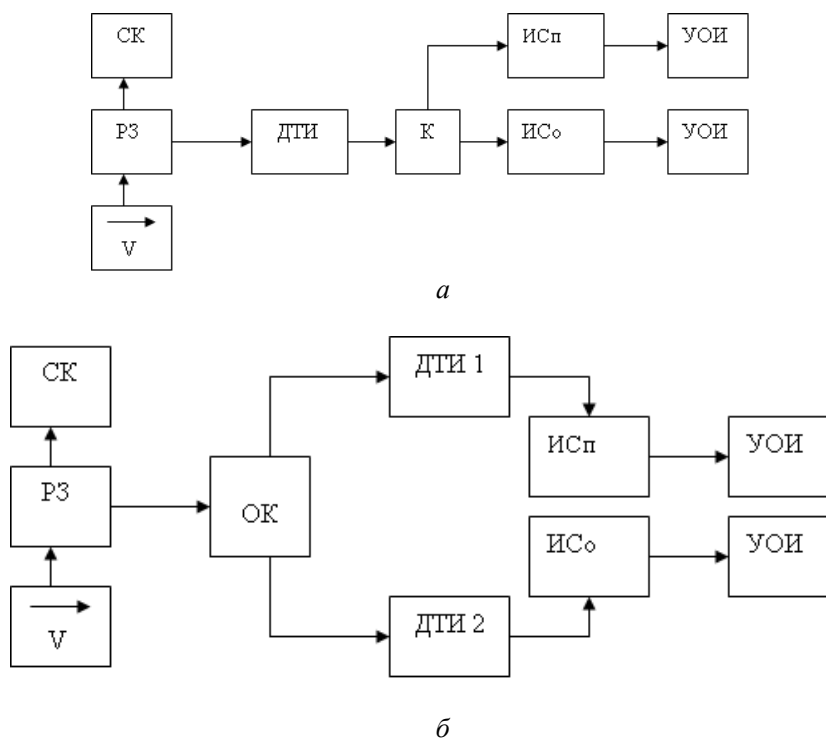


Рис. 4.11. Схемы поверки ИУС аналогового, аналого-цифрового и цифрового типов

Для поверки (исследования) точностных характеристик аналоговых и аналого-цифровых ИУС используется специализированная установка, схема которой приведена на рис. 4.13. Установка включает, кроме ИУС, стойку датчика ТИ и контрольно-измерительную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА). Стойка ДТИ (рис. 4.14) содержит телекамеру 1 и столик 2, на который помещается объект манипулирования ОР 3. Телекамера крепится к поворотному узлу 4, фиксируемому, как и столик 2, на стержне 5, удерживаемом в вертикальном положении с помощью основания 6. Источники света 7 установлены на стержнях 8, вставленных в держатели 9. ОРЗ распола-

гается на размеченной поверхности 10 столика 2, подсвечиваемой снизу источниками света (на рисунке не показаны).

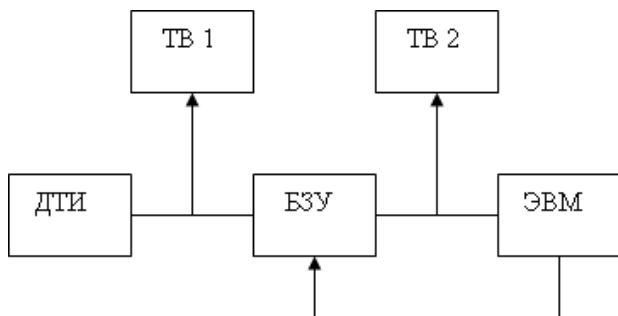


Рис. 4.12. Схема поверки цифровой ИУС

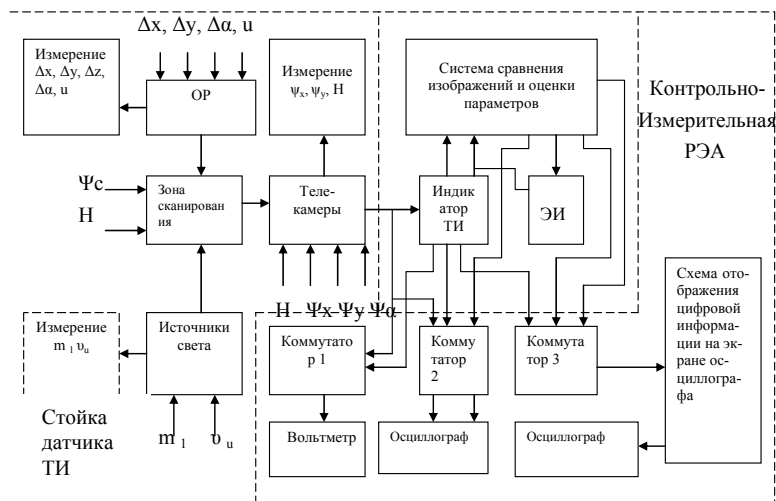


Рис. 4.13. Структурная схема метрологической установки для оценки точностных характеристик ИУС

Размер столика (0,5×0,5) м, а высота стойки в сборе (0,8–2,26) м. Конструкция стойки позволяет изменять значения Ψ_x ($\pm 30^\circ$), Ψ_y ($\pm 10^\circ$), H (0,1–1,5) м, m_1 (0,5) м и поворачивать столик, датчик ($\Psi_c = \Psi_g = 360^\circ$) и источники света ($v_n = 360^\circ$). Для контроля Ψ_x , Ψ_y , H , m_1 , Ψ_c , Ψ_g , v_n и положения ОР узлы стойки имеют соответствующую разметку. С помощью видеоконтрольного устройства (ВКУ) и осциллографов одновременно контролируется работа различных каналов ДТИ и других блоков ИС.

Отметим, что при проверке цифровых ИУС отпадает необходимость использования контрольно-измерительной РЭА. Так как в этом случае весь контроль осуществляется с помощью ЭВМ (ее дисплея) и телевизоров.

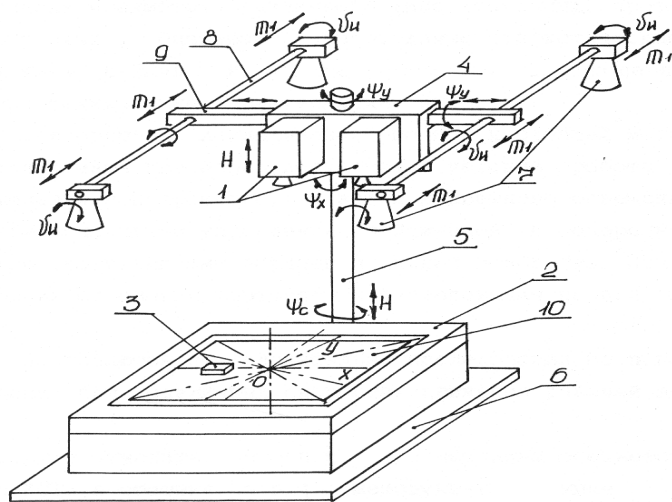


Рис. 4.14. Внешний вид датчика текущего изображения

При проверке работоспособности отдельных блоков и ИС в целом могут быть использованы известные методики аттестации, например, оценка координатных и геометрических искажений путем измерения искажения изображения квадрата, воспринимаемого телевизионной камерой и воспроизводимого на экране ВКУ. Оценка

точностных и других характеристик ИУС производится по следующей методике.

1. ОР помещается в зону сканирования и с помощью соответствующей подсветки создается качественное (четкое и без искажений) ТИ, контролируемое ВКУ и телевизорами. Затем ОР в зоне сканирования двигается и разворачивается на величины, контролируемые разметкой. Определяются требуемые статистические характеристики величин Δx , Δy , Δz , α_i и проверяются другие технические характеристики ИУС.

2. Затем в зону сканирования помещаются несколько ОР (сначала одного цвета, а потом разноцветные), снимаются показания для определения правильного распознавания формы, цвета и положения ОР. Эта же операция повторяется при добавлении в РЗ помех (посторонних предметов) различного типа (точечных, протяженных, контурных). Оцениваются необходимые статистические характеристики величин P , $P_{ц}$, Δx , Δy , Δz , α_i и проверяются требуемые технические характеристики ИУС.

3. Повторяются исследования по п. 1 настоящей методики для установления предельно допустимых условий работы ИС в изменении монохромного, а затем и цветного освещения ОР в рабочей зоне путем управления положением и очередностью включения светильниками верхней и нижней подсветки. При этих же условиях освещения повторяются исследования по п. 2 методики.

4. Повторяются последовательно исследования по пп. 1–3 методики при различных скоростях движения рабочей зоны с ОР.

Следует отметить, что пп. 1–3 методики соответствуют проверке ИУС в статике, а п. 4 методики – в динамике.

Так как погрешность ИС может принимать в разных точках диапазона измерений разные значения, поэтому необходимо нормировать пределы допускаемых погрешностей, т.е. необходимо установить какие-то границы, за пределы которых погрешности ИУС не должны выходить при эксплуатации информационной системы. В зависимости от допускаемых значений погрешности можно присваивать класс точности ИУС. Как и для любой измерительной системы, предел допускаемой погрешности ИУС может устанавливаться в виде абсолютной, относительной и приведенной погрешностей, определяемых известными способами. Наряду с основной погреш-

ностью нормированию подлежит и дополнительная погрешность. Методика нормирования указанных погрешностей дана в [1].

4.8. Контроль и диагностика информационных устройств и систем

4.8.1. Отказы и надежность информационных систем

Получение адекватной оценки эффективности функционирования является важным этапом проектирования ИУС. Эффективность информационной системы принципиальным образом зависит от ее назначения, которое для всякой ИУС состоит в выработке совокупности информационных параметров на основе данных, поступающих от датчиков. При этом обслуживаемые с помощью ИУС прикладные задачи весьма разнообразны. Среди них в задачах мехатроники можно выделить динамическое позиционирование в точке транспортного робота, снятие информации и управление положением антенн и солнечных батарей космического аппарата. Ясно, что основными составляющими эффективности ИУС являются точность, обеспечиваемая ею при выработке, например, навигационных параметров, и надежность.

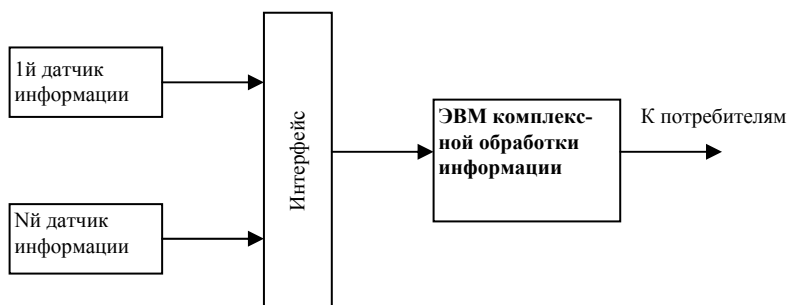


Рис. 4.15. Структура интегрированной информационной системы

Достижение необходимой точности представляет собой сложную научно-техническую задачу, решаемую путем создания совершенных первичных датчиков информации (чувствительных элемен-

тов), построения эффективных алгоритмов обработки информации, совместного использования различных ИУС в мехатронике. Характерной чертой многих современных ИУС и в особенности автономных ИУС, используемых, например, в робототехнике, является избыточность (структурная и информационная). Это видно из примерного состава современной ИУС (рис. 4.15).

В данную ИУС входят несколько подсистем, например: внешние датчики очувствления и адаптации робота. Подобные ИС обычно называют интегрированными ИС или навигационными комплексами.

Коротко остановимся на подходах, используемых при оценке точности ИУС. Под точностью понимается свойство ИС обеспечивать нахождение в пределах некоторого допуски характеристик погрешностей вырабатываемых параметров. Как правило, погрешности параметров рассматриваются как случайные процессы, что объясняется множественностью причин, влияющих на показания датчиков информации, и вследствие этого подходы к оценке точности носят стохастический характер. При этом способы задания требований к точности могут быть различными, а их выбор зависит, прежде всего, от преследуемой цели. Здесь можно выделить два основных варианта. В первом варианте цель состоит в предъявлении требований по точности к проектируемой или сертифицируемой системе, во втором – к системе, находящейся в эксплуатации. Обычно при проектировании и сертификации требования формулируются в отношении статистических характеристик погрешностей, при эксплуатации – в отношении реализаций погрешностей.

Среди подходов к определению требований по точности к ИУС при ее проектировании и сертификации выделим два, один из которых состоит в использовании эллиптических и круговых ошибок местоположения, а второй – в использовании p -квантилей погрешности вырабатываемых навигационных параметров.

При использовании понятий эллиптической и круговой ошибок требуемая точность определения, например местоположения робота, отражается соответственно либо эллипсом, либо кругом, ограничивающими область возможного местоположения определяющегося объекта. По своему происхождению эллиптическая ошибка – это линия равного уровня двухмерной гауссовской плотности распределения вероятности вектора погрешностей выработки координат, а

круговая ошибка – это статистически эквивалентное представление эллиптической ошибки в виде круга.

При использовании понятия p -квантили погрешности требование по точности выработки некоторого параметра формулируется путем задания такого значения χ_p (p -квантили) погрешности $x(t)$, вероятность $P(|x(t)| < \chi_p)$ непревышения которого в момент времени t не меньше заданной величины p . Другим (более жестким требованием) может быть требование для той же p -квантили, но на заданном интервале времени T . В обоих случаях используются некоторый заданный допустимый уровень и вероятность непревышения этого уровня. На практике в этой части существуют определенные традиции, в соответствии с которыми значение уровня выбирают обычно равным 3σ , что в предположении гауссовости плотности распределения вероятностей значений погрешности означает квантиль уровня $p = 0,991$ (σ – среднеквадратическое значение погрешности).

На этапе эксплуатации ИС для формулирования требований по точности выработки некоторого параметра может использоваться задание допустимого уровня x_0 для текущего значения $x(t)$ погрешности, а именно $|x(t)| < \chi_p$.

При этом в качестве x_0 обычно выбирается значение квантили, соответствующее большому уровню p . Все ограничения на характеристики погрешности назначаются исходя из условия той прикладной задачи, которая обслуживается данной ИС. Так, например, если задача состоит в проводке судна через узкий пролив, то значение x_0 рассчитывается исходя из ширины пролива.

Другой не менее важной характеристикой эффективности ИУС является ее надежность. Далее будет показано, что если свойство надежности трактовать для ИУС строго в соответствии с ГОСТом, то оказывается, что оно включает в себя свойство точности. Для того чтобы система в процессе эксплуатации могла бы решать поставленные перед ней задачи, она должна находиться в работоспособном состоянии, т.е. должна быть способна выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. При этом свойство системы сохранять работоспособное состояние в определенных условиях

эксплуатации и называют ее надежностью. Время от времени в системе могут возникать нарушения работоспособности – отказы. Если отказ самоустраняющийся и кратковременный, то его называют сбоям.

Любой отказ системы является следствием некоторой причины. Традиционно полагается, что к отказам системы приводят дефекты ее элементов, которые в ГОСТе определяются как любые несоответствия элемента предъявляемым требованиям. При этом дефекты различаются по их влиянию на работу элемента, в частности, выделяются малозначительные и критические дефекты. Малозначительные дефекты несут незначительные последствия для дальнейшего использования элемента, критические же, наоборот, приводят к отказу элемента, который, в свою очередь, может повлечь за собой отказ системы. Появление дефекта необязательно сопровождается немедленным появлением отказа системы. Отказ может произойти либо позже, либо вообще не произойти. Причиной задержки в появлении отказа системы может служить слабое влияние дефекта на работоспособность системы в момент его возникновения и на некотором последующем отрезке времени. Причиной не появления отказа системы при наличии дефекта элемента является, например, избыточность системы.

Традиционно используемый на практике подход к оценке надежности системы состоит в учете лишь тех отказов, которые являются следствием возникновения критических дефектов (отказов) в элементах аппаратуры и при которых восстановление системы возможно лишь путем замены дефектного (отказавшего) элемента. При этом надежность системы зависит от состава и количества входящих в нее элементов, от надежных характеристик каждого из элементов, от способа соединения этих элементов в систему, а также от используемой дисциплины обслуживания системы (используемых средств и процедур контроля, диагностики и восстановления).

Процесс возникновения отказов является случайным ввиду множественности причин, влияющих на их появление. В связи с этим для оценки надежности системы используются различные статистические характеристики, показывающие степень подверженности системы отказам, например вероятность $P(t)$ безотказной работы (ВБР) системы на интервале $(0, t)$. В простейшем случае, когда система безызыточна и отказы ее элементов статистически независимы, эта характеристика системы определяется как произведение

аналогичных характеристик для ее элементов, получаемых в результате проведения соответствующих испытаний.

Конкретизируем понятия работоспособного состояния и отказа применительно к ИУС. Очевидно, что ИУС находится в работоспособном состоянии, если она вырабатывает все навигационные параметры с погрешностями, определенные характеристики которых не превышают заданных допусков. Отсюда видно, что понятие работоспособного состояния, а значит, и понятие надежности для ИУС включают в себя понятие точности. Далее будем считать, что событие отказа наступает в ИУС в случае, когда хотя бы один из навигационных параметров вырабатывается в ИУС с повышенной погрешностью или вообще не вырабатывается [3].

Событие, представляющее отказ ИУС, может формулироваться, например, как появление в реализации погрешности выброса (ограниченного по времени превышения) длительностью не менее A над заданным уровнем x_0 или как появление не менее n выбросов длительностью не менее D в течение заданного интервала времени $(0, t)$. На рис. 4.16 приведены примеры отказов ИС. Причем в моменты t_1 , t_2 и t_3 возникают выбросы реализации погрешности, которые могут быть признаны или не признаны отказами в зависимости от используемого определения отказа.

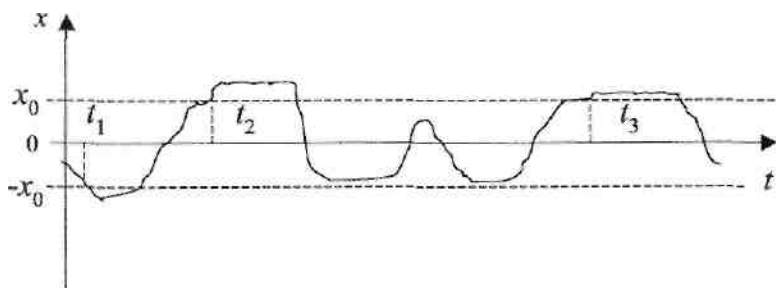


Рис. 4.16. Примеры отказов ИС

Очевидно, что к отказу ИС могут приводить критические дефекты (отказы) ее элементов. Далее такие отказы ИУС будем называть аппаратными. Однако характерной особенностью ИУС является возможность ее отказа и при отсутствии критических дефектов в элементах. Такие отказы в противоположность аппаратным назы-

ваются информационными. Важным свойством информационного отказа (ИО) ИУС является то, что после него система либо самовосстанавливается, либо для ее восстановления достаточно лишь коррекции ее внутренней информации и не требуется замены элементов. Именно это свойство послужило основанием для использования термина «информационный отказ».

Аналогично можно определить понятие информационного отказа для любого компонента ИУС и, в частности, для ее подсистем и первичных датчиков информации, если для них сформулированы требования по точности. Таким образом, приходим к классификации отказов, представленной на рис. 4.17.

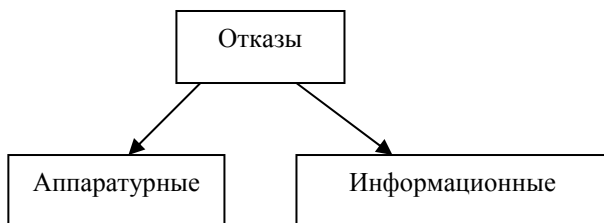


Рис. 4.17. Классификация отказов ИС

Как уже было сказано, причиной аппаратурного отказа ИУС является критический дефект ее элемента. Причины возникновения информационных отказов весьма разнообразны и зависят от специфики конкретной ИУС. Так или иначе это некоторые аномальные события, сопровождающие внутренние или внешние по отношению к ИУС физические процессы. Такие события в свою очередь приводят к аномальным событиям в погрешностях ИУС, которые называются информационными нарушениями.

Среди причин, приводящих к информационным нарушениям, можно выделить следующие классы:

1. Причины, связанные с датчиками ИУС.
2. Причины, связанные с вычислительными устройствами обработки информации (сбои аппаратуры и ошибки программного обеспечения).
3. Причины организационного характера (отсутствие своевре-

менной коррекции автономной ИУС, например, по причине неблагоприятных метеоусловий).

События, соотнесенные со вторым и третьим классами, ввиду их специфики далее не рассматриваются.

Раскроем содержание первого класса. Здесь, в свою очередь, можно выделить три подкласса:

- аномальные события во внутренних физических процессах, протекающих в исправных датчиках;

- малозначительные дефекты в датчиках, не приводящие к катастрофическим последствиям для их функционирования;

- аномалии во внешней среде, влияющие на работу датчиков.

Последний подкласс, например для ИУС транспортного робота, может включать аномалии в условиях региона, в условиях распространения радио- и телевизионных сигналов и т.п. К аномалиям в условиях региона можно также отнести неоднородности теплового, электромагнитного и гравитационного полей.

Заметим, что аномалии во внешней среде, вызывая в ИС информационный отказ, могут создавать для нее нештатную ситуацию, не предусмотренную в требованиях к ИУС. Очевидно, что такие информационные отказы не должны учитываться при оценке надежности ИУС.

В зависимости от того, как проявляются информационные нарушения, их можно подразделить на две группы. Информационные нарушения из первой группы проявляются в виде повышенных значений номинальной погрешности датчика, возникающих достаточно редко. В нее войдут информационные нарушения, являющиеся следствием первого подкласса физических причин. Информационные нарушения из второй группы проявляются в виде аномальной дополнительной погрешности датчика. В нее войдут информационные нарушения, являющиеся следствием второго и третьего подклассов физических причин. Первую группу информационных нарушений называют выбросами в реализациях погрешности датчика, подсистемы, ИУС, вторую – дополнительными аномальными погрешностями.

Прокомментируем механизм возникновения выбросов в реализациях погрешности. Считается, что адекватным описанием погрешности является представление ее в виде случайного процесса. Причем в случае ИУС (подсистемы или датчика ИУС) описание, как

правило, имеет сложную многокомпонентную структуру, т.е. погрешность представляется в виде суммы нескольких случайных процессов. Очевидно, что даже при номинальном поведении этих процессов возможны события, при которых значения разных компонент суммируются с одним знаком, создавая аномальный выброс для общей погрешности ИУС. В общем случае не исключается также ситуация, когда одна отдельно взятая компонента погрешности ИУС принимает аномально большое значение. В подобных фактах обычно усматривают основание для использования при описании погрешности гауссовской плотности распределения вероятности, которая фактически является нереализуемой математической моделью, поскольку допускает бесконечные значения для описываемых процессов.

Последствия информационного нарушения для ИУС могут быть различными. Оно может привести к информационному отказу ИУС, причем событие отказа по отношению к событию нарушения может произойти без задержки или с некоторой задержкой, порой весьма значительной, зависящей от структуры погрешности ИУС. Информационное нарушение может не привести к информационному отказу ИУС, но привести к информационному отказу подсистемы или первичного датчика информации, входящих в состав ИС, если понятие отказа для них определено. Оно может не иметь ни одного из указанных последствий, если его величина незначительна.

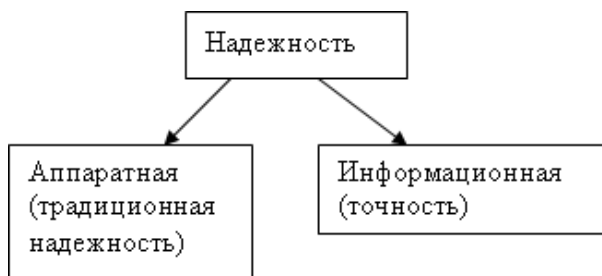


Рис. 4.18. Классификация надежности ИС

4.8.2. Особенности контроля и диагностики информационных систем

Как уже отмечалось, назначение средств контроля и диагностики состоит в обнаружении (контроле) и локализации места (диагностике) отказа (дефекта) информационной системы.

Средства контроля и диагностики (КД) ИС подразделяются на тестовые и функциональные. В первом случае контроль и диагностика осуществляются на основе специально формируемых тестовых воздействий во время перерывов в функционировании системы (подсистемы) по прямому назначению (рис. 4.19, а), во втором – на основе рабочих воздействий в процессе функционирования системы (подсистемы) по прямому назначению (рис. 4.19, б).

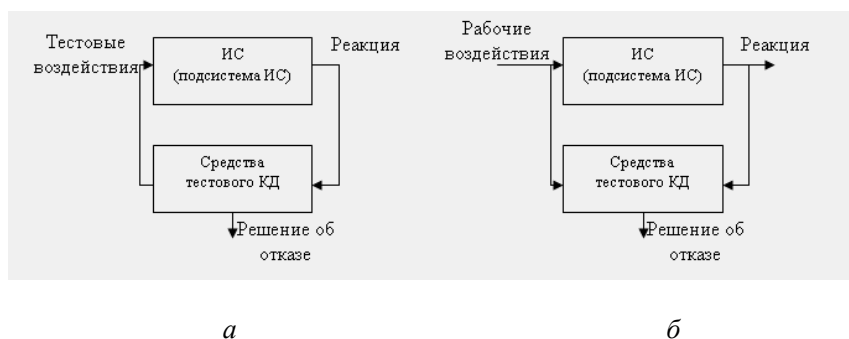


Рис. 4.19. Блок-схемы тестового (а) и функционального (б) КД

Общие правила построения тестовых воздействий для любого устройства состоят в следующем:

- описывается класс отказов устройства $E = \{e_i | i=1, N\}$, подлежащий диагностированию;
- для каждого отказа e_i из класса E по описанию устройства отыскивается и включается в результирующий тест входная последовательность u_{Ti} такая, что исправное устройство в ответ на эту последовательность выдает выходную последовательность z_i , а не-

исправное устройство – выходную последовательность $\overline{z_i}$, причем $\overline{z_i} \neq z_i$.

Общие правила построения средств функционального КД для любого устройства такие:

– описывается класс отказов устройства $E = \{e_i \mid i = \overline{1, N}\}$;

– синтезируется контролирующее устройство по описанию контролируемого устройства (контролирующее устройство в частном случае является моделью контролируемого) со следующими правилами:

– пусть между выходными последовательностями z_0 контролируемого и z_k контролирующего устройств, находящимися в исправном состоянии, существует функциональная связь $\varphi(z_0) = z_k$, тогда при появлении любого отказа e_i из класса E функциональная связь φ должна нарушаться, т.е. $\varphi(\overline{z_0}) \neq z_k$ (отказ в ИС), $\varphi(z_0) \neq \overline{z_k}$ (отказ в средствах функционального КД).

Приведенные правила дают лишь слабое представление об истинной сложности используемых алгоритмов проектирования средств КД. В общем случае они достаточно сложны, поскольку включают анализ не только исправного контролируемого устройства, но и его неисправных модификаций.

Обычно средства КД системы представлены совокупностью фрагментов, каждый из которых включается в состав некоторого контролируемого им устройства или подсистемы в виде встроенного аппаратного или программного модуля. Только таким образом удастся достичь необходимой глубины диагностики (точности локализации отказа). Несмотря на распределенность реализации, работа этих фрагментов скоординирована в рамках общей системы КД и подытоживается комплексным анализом технического состояния контролируемой ИУС.

Коротко оценим известные проблемы функционального КД. При решении задачи КД обычно выделяют три подхода, заключающихся в использовании при синтезе средств КД инвариантов, моделей объектов КД и «аналитической» избыточности.

При первом подходе для решения задачи контроля и диагностики осуществляется контроль инвариантов, имеющих в описании

объекта КД, т.е. характеристик объекта, остающихся неизменными при его нормальном функционировании. Ими, например для линейных систем, являются полюса, собственные числа, статический коэффициент усиления и т.п.

При втором подходе средства КД реализуют модель объекта КД. Размерность этой модели может совпадать с размерностью объекта, но может быть и меньше нее. При этом могут применяться разнообразные методы редукции моделей [3]. Заметим, что широко применяемым вариантом средств функционального КД, построенных на основе этого подхода, является дублирование. В этом случае они представляют собой дополнительный экземпляр контролируемого устройства (или его модель, характеризующуюся большой степенью адекватности), с выходами которого сравниваются выходы основного устройства, а по результатам сравнения делаются выводы о работоспособности.

При третьем подходе решение задачи КД осуществляется путем такого синтеза средств контроля и диагностики (введения избыточности), в результате которого между выходами объекта и средств КД возникают аналитические соотношения (контрольные условия, соотношения паритета). Проверка этих соотношений и составляет алгоритм решения задачи КД.

Следует заметить, что между рассмотренными подходами нет четких границ. Так, например, контрольные соотношения, используемые в третьем подходе, можно рассматривать как некоторые инварианты на множестве выходов избыточной системы, а «сильно» редуцированная модель объекта при втором подходе может напоминать «аналитическую» избыточность. Обсуждаемые в настоящей книге методы принадлежат второму подходу.

Рассмотрим особенности системы КД ИУС. Обобщенно структуру ИУС можно представить как состоящую из трех последовательно включенных компонентов: датчиков информации, преобразователей информации из аналоговой формы в цифровую и устройств цифровой обработки информации (рис. 4.20).

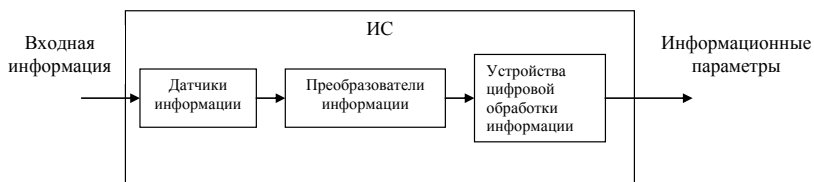


Рис. 4.20. Компоненты информационной системы

Безусловно, в реальной ИС, как правило, используется распределенная обработка информации, когда ИС содержит в своем составе несколько подсистем, каждая из которых реализует свой фрагмент алгоритма обработки информации (см. рис. 4.20). Тогда приведенная структура соответствует подсистеме ИУС. При корректном построении системы КД ИУС все компоненты ИУС должны быть охвачены средствами КД.

Рассмотрим возникающие при этом проблемы. На практике наиболее эффективные варианты технической реализации решения задачи КД удастся найти для устройства цифровой обработки информации. Последнее обычно представляет собой специализированную ЭВМ или в случае распределенной обработки информации – локальную вычислительную сеть. Производительность используемых вычислительных машин выбирается таким образом, чтобы у них возникал ресурс свободного от обработки навигационной информации времени. Этот ресурс расходуется на проведение тестового контроля и диагностики как устройств ЭВМ, так и других устройств ИУС. Широкое применение тестовых методов КД в отношении устройств ЭВМ оказывается возможным благодаря принятой во всех современных ЭВМ магистральной организации. При этом входы устройств ЭВМ доступны для управления, их выходы – для наблюдения, а тестовые средства КД реализуются в виде программных модулей. Методы функционального контроля и диагностики также находят применение при решении задачи КД ЭВМ, хотя и ограниченное. Обычно эти методы используются в отношении блоков памяти и магистралей передачи информации.

Труднее найти эффективную техническую реализацию для решения задачи КД в отношении преобразователей информации. Причиной этому являются, во-первых, практическое отсутствие ресурса

времени ввиду непрерывности процесса измерения, а во-вторых, значительные затраты на реализацию функциональных методов КД. В связи с этим индивидуальные средства, соотнесенные непосредственно с преобразователями, обладают обычно ограниченными возможностями.

Наконец, наибольшие трудности возникают при решении задачи КД в отношении датчиков, что связано с отсутствием по понятным причинам возможности непосредственного управления их входами, а значит, с невозможностью использования тестовых методов КД. Таким образом, для датчиков остается единственный выход в виде средств функционального КД. При этом поскольку входами датчиков не только невозможно управлять, но их также невозможно и наблюдать, то задача функционального КД должна решаться в условиях, когда входы объекта КД неизвестны. Эту задачу иногда называют задачей функционального КД при неизвестных и ненадежных входах. В этом случае предполагается, что контролируется некоторая система или ее подсистема, а класс рассматриваемых отказов ограничен отказами входов (датчиков) или включает их.

Задача КД датчиков информации может быть сформулирована в разных постановках. Одним из параметров, по которому различаются возможные постановки, является уровень устройств, чьи выходы анализируются при решении задачи КД. Обычно выделяют два уровня – уровень подсистем и уровень комплексной обработки информации, или комплексный уровень. На первом уровне средства КД подсистем анализируют выходы устройств той подсистемы, в которую они входят, и формируют выводы о работоспособности этих устройств и подсистемы в целом. На втором уровне средства КД на основе анализа выходов подсистем и с привлечением выводов их средств КД формируют выводы о работоспособности этих подсистем и ИС в целом.

На рис. 4.21 поясняется роль функциональных средств КД (СКД) комплексного уровня в работе ИУС, где информационные подсистемы представлены тремя ИП.

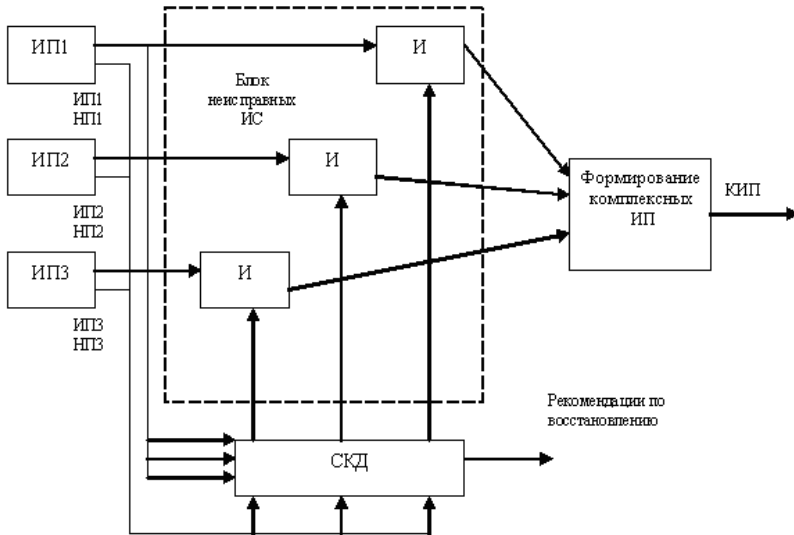


Рис. 4.21. Роль СКД в функционировании ИИС

Выходные параметры и контрольно-диагностические признаки этих ИП анализируются в средствах КД комплексного уровня. При обнаружении нарушений или отказов в какой-либо ИП ее выходная информация блокируется, т.е. исключается из процедуры формирования комплексных информационных параметров. Кроме того, для отказавшей ИП указывается адекватная процедура ее восстановления. На рис. 4.21 ИП 1(2,3) и ИР 1(2,3) обозначают соответственно информационные параметры и диагностические признаки, вырабатываемые в ИП 1(2,3), КИП – комплексные ИП. Процедура блокировки данных от неисправных ИП условно отражена на рисунке в виде схем (И) логического умножения.

Отметим одну важную особенность средств КД комплексного уровня. Несмотря на то, что эти средства проектируются для решения задачи КД датчиков, значимость этих средств для ИС существенно больше, поскольку они обнаруживают любой отказ, проявляющийся на выходе какой-либо из ее подсистем. Этот факт позволяет взглянуть на них как на универсальные средства КД. Присутствие в ИС таких средств КД представляется очень важным, поскольку

на практике многие средства КД уровня подсистем, как правило, весьма неполны и характеризуются значительными ошибками при принятии решений об отказах [3].

Заключение

1. Даны основные метрологические характеристики ИУС, предназначенные для определения результатов измерения, определения чувствительности к влияющим величинам и оценки динамических характеристик ИУС. Предложена классификация погрешностей (систематических, случайных, грубых) ИУС по таким основаниям, как закономерность проявления, причины возникновения и характер взаимодействия со средой ИС, и в этой связи рассмотрены погрешности ИУС: инструментальные, методические, модели, классификации, внешние, энергетические и субъективные; показано, что инструментальные погрешности делятся на статические (основные и дополнительные), динамические, и взаимодействие ИУС ОР.

2. Рассмотрены вопросы метрологической поверки ИУС, реализующие две схемы непосредственного сличения проверяемой и образцовой ИУС (с одним или двумя датчиками). Предложена методика исследования ИУС.

Тесты к главе 4

1. Единство измерений – это:
 - а) Состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы.
 - б) Применение одинаковых единиц измерения в рамках ЛПУ или региона.
 - в) Получение одинаковых результатов при анализе пробы на одинаковых средствах измерения.
 - г) Применение однотипных средств измерения (лабораторных приборов) для определения одноименных физиологических показателей.

2. Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых:
 - а) Измерениями.
 - б) Погрешностями.
 - в) Эталонами.
 - г) Величинами.

3. Получение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью – это:

- а) Предмет.
- б) Объект.
- в) Направление.
- г) Задача метрологии.

4. Виды погрешности при измерениях – это:

- а) Систематические и случайные.
- б) Абсолютные и относительные.
- в) Систематические и несистематические.
- г) Обязательные и случайные.

5. Какое понятие не относится к методам измерения?

- а) Непосредственный.
- б) Сравнения с мерой.
- в) Эталонный.
- г) Нулевой.
- д) Контактный.

6. Косвенные измерения – это такие измерения, при которых:

а) Применяют метод наиболее быстрого определения измеряемой величины.

б) Искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других физических величин, связанных с искомой известной функциональной зависимостью.

в) Искомое значение физической величины определяют путем сравнения с мерой этой величины.

г) Искомое значение величины определяют по результатам измерений нескольких физических величин.

7. Измерение, при котором искомое значение физической величины определяют непосредственно путем сравнения с мерой этой величины, это:

- а) Статистическое.
- б) Динамическое.
- в) Прямое.
- г) Косвенное.

8. Какой из перечисленных этапов не является этапом прямых измерений?

- а) Взаимодействие с объектом измерений.
- б) Оценка характеристик погрешности результата.
- в) Вычисление результата косвенных измерений.
- г) сопоставление со шкалой.

9. Погрешности, обусловленные особенностями реализованного алгоритма работы системы, различными аппроксимациями, округлениями, неучетом различных факторов, влияющих на результат измерения:

- а) Методические.
- б) Статистические.
- в) Переменные.
- г) Абсолютные.

10. Погрешность ИС, возникающая при изменении характеристик (очертание контура, цвета) и положения ОР (при его движении):

- а) Погрешность в динамическом режиме.
- б) Относительная погрешность.
- в) Динамическая погрешность.

11. Нарушение работоспособности:

- а) Помехи.
- б) Надежность.
- в) Отказ.

12. Отказы ИС делятся на:

- а) Элементные и совокупные.
- б) Аппаратурные и информационные.
- в) Производственные и непроизводственные.

13. Техническое устройство, предназначенное для измерений:

- а) Эталон измерения.
- б) Средство измерения.
- в) Единство измерения.
- г) Единица измерения.

14. Область значений измеряемой величины, в пределах которой нормированы допустимые погрешности средств измерений, называется:

- а) Диапазоном измерений.
- б) Единицей измерения.
- в) Нормой.
- г) Измеримостью.

15. Проверка средств измерений:

а) Определение характеристик средств измерений любой организацией, имеющей более точные измерительные устройства, чемверяемое.

б) Калибровка аналитических приборов по точным контрольным материалам.

в) Совокупность операций, выполняемых органами государственной службы с целью определения и подтверждения соответствия средств измерений установленным техническим требованиям.

г) Совокупность операций, выполняемых организациями с целью определения и подтверждения соответствия средств измерений современному уровню.

16. Проверки соблюдения метрологических правил и норм проводятся с целью:

а) Определения состояния и правильности применения средств измерений.

б) Контроля соблюдения метрологических правил и норм.

в) Определения наличия и правильности применения аттестованных методов выполнения измерений.

г) Контроля правильности использования результатов измерения.

17. Средства контроля и диагностики делятся на:

а) Тестовые и функциональные.

б) Аппаратурные и информационные.

в) Элементные и совокупные.

18. Основные объекты измерений:

а) Постоянные величины.

б) Показательные величины.

в) Физические величины.

г) Полученные величины.

19. Какая составляющая погрешности измерений обусловлена потреблением ИС мощности от исследуемого объекта?

а) Субъективная погрешность.

б) Энергетическая.

в) Внешняя.

20. Какие из погрешностей делятся на постоянные и переменные?

а) Грубые.

б) Случайные.

в) Систематические.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Метрология, метрологическое обеспечение ИС.

2. Метрологические характеристики ИС.

3. Понятие погрешности измерений.

4. Классификация погрешностей.

5. Виды распределения случайных величин.

6. Оценка статистических характеристик погрешностей ИС.
7. Основные этапы измерительных технологий.
8. Примеры взаимодействия датчиков с объектом исследования.
9. Поверка ИС.
10. Отказы и надежность ИС.
11. Особенности контроля и диагностики ИС.

Список литературы к главе 4

1. *Системы* технического зрения: справочник / В.И. Сыряжкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др.; под общ. ред. В.И. Сырямкина, В.С. Титова. Томск, 1992. 367 с.
2. *Нормирование* и использование метрологических характеристик средств измерений (ГОСТ 8ю009–84). М.: Изд-во стандартов, 1985. 150 с.
3. *Дмитриев С.П. и др.* Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004.
4. *Солопченко Г.Н.* Курс лекций «Метрология, стандартизация и сертификация». URL: http://www.ii.spb.ru/2005/ins_inn_material/baza_0/list_manuals_and_publications.pdf
5. *Основы* метрологии и электрические измерения / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; под ред. Е.М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
6. *Спектор С.А.* Электрические измерения физических величин. Методы измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.
7. *Грановский В.А., Сирая Т.Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
8. *Претт У.* Цифровая обработка изображений: пер с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
9. *Богомолов Е.Н., Жданов Д.С., Глушков Г.С. и др.* Метрология и сертификация диагностического оборудования и материалов / под ред. В.И. Сырямкина. Томск, 2014. 172 с.

Глава 5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

5.1. Введение

Важным фактором создания ИУС является разработка системы автоматизированного проектирования (САПР). Системы автоматизированного проектирования находят широкое применение во многих областях науки, техники и производства, где используются сложные технические системы и их элементы: автоматические линии для изготовления деталей и узлов машин, гибкие автоматизированные производственные системы, транспортные устройства, роботы-манипуляторы [1, 2]. К таким сложным системам относятся и ИУС.

По мере развития ИУС все более усложнялось их проектирование, поэтому встала задача автоматизации процесса проектирования этих систем. Но, в отличие от других технических систем, САПР для ИУС получили свое развитие лишь в последние 10–15 лет [1, 4].

Проектирование – это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще несуществующего объекта, на основе начального описания (технического задания), преобразования первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, коррекции начального описания и последовательного представления описаний на различных языках, разработки (изготовления и исследования) макета системы и подготовки производства [2, 3].

Как и при автоматизации проектирования любого другого устройства, САПР ИУС представляет собой комплекс средств автоматизации проектирования (организационного, методического, лингвистического, информационного, математического, программного и технического обеспечения).

Основные положения такой САПР рассмотрены в данной главе. Вначале (п. 5.2) приводится структура САПР ИУС, представляющая собой итерационный процесс, а затем (п. 5.3) детально излагается структурный синтез ИС на основе одного из перспективных мето-

дов – функционально-стоимостного анализа. При параметрическом синтезе (п. 5.4) определяется допустимая погрешность оценки координат при минимизации затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией ИУС, и приводится инженерный (приближенный) расчет ИУС. В заключение (п. 5.5) описываются структура (состав) и программное обеспечение аппаратно-программного комплекса, предназначенного для моделирования и проектирования ИУС.

5.2. Структура САПР информационных устройств и систем

Системы автоматизированного проектирования. Проектирование. Виды проектирования

Проектирование – это комплекс работ по исследованию, расчетам и конструированию нового изделия или нового процесса. В основе проектирования лежит первичное описание – техническое задание [1–4].

Неавтоматизированное проектирование – процесс проектирования, осуществляемый человеком вручную (без использования ЭВМ).

Автоматизированное проектирование – проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и ЭВМ.

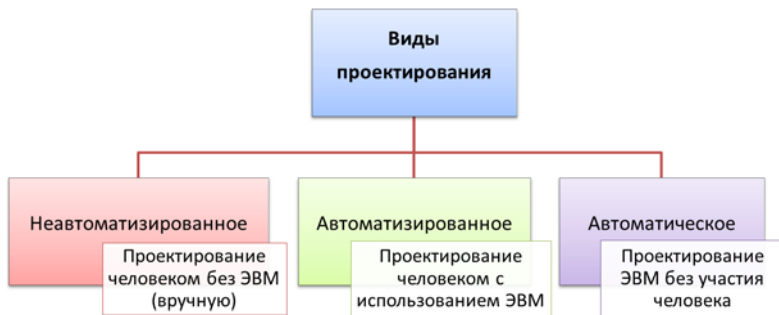


Рис. 5.1. Классификация видов проектирования

Автоматическое проектирование – проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и алгоритма его функ-

ционирования осуществляются без участия человека. Автоматическое проектирование возможно лишь в отдельных частных случаях для сравнительно несложных объектов.

На рис. 5.1 представлена классификация видов проектирования.

САПР: понятие, цели, функции, возможности

САПР – организационно-техническая система, входящая в структуру проектной организации (отдела) и осуществляющая проектирование при помощи комплекса средств автоматизированного проектирования (КСАП).

Основная функция САПР – выполнение автоматизированного проектирования на всех или отдельных стадиях проектирования объектов и их составных частей.

САПР решает задачи автоматизации работ на стадиях проектирования и подготовки производства.

Основная цель применения САПР – повышение эффективности труда инженеров, включая:

- сокращение трудоёмкости проектирования и планирования;
- сокращение сроков проектирования;
- сокращение себестоимости проектирования и изготовления, уменьшение затрат на эксплуатацию;
- повышение качества и технико-экономического уровня результатов проектирования;
- сокращение затрат на натурное моделирование и испытания.

Возможности САПР

Эффективность применения САПР обеспечивается следующими ее возможностями:

- автоматизации оформления документации;
- информационной поддержки и автоматизации процесса принятия решений;
- использования технологий параллельного проектирования;
- унификации проектных решений и процессов проектирования (использование готовых фрагментов чертежей: конструктивных и геометрических элементов, унифицированных конструкций, стандартных изделий);
- повторного использования проектных решений, данных и работ;
- стратегического проектирования;
- замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием;

- повышения качества управления проектированием;
- применения методов вариантного проектирования и оптимизации.

Подходы к проектированию

Существует два вида моделей – двумерная и пространственная геометрическая модели.

Двумерная геометрическая модель

- Создается чертеж, который служит средством графического представления изделия, содержащего информацию для решения графических задач, а также для изготовления изделия. Использование вычислительной техники облегчает оформление конструкторских документов, насыщенных изображениями стандартных, типовых, унифицированных составных частей, (например, электрических и других принципиальных, функциональных схем, печатных плат, модулей, приборов, электронных блоков, стоек, шкафов, пультов и т.д.); разработку текстовых документов (спецификаций, перечней элементов и др.).

Пространственная геометрическая модель

- Является более наглядным способом представления оригинала и более мощным и удобным инструментом для решения геометрических задач. Чертеж в этих условиях играет вспомогательную роль, а методы его создания основаны на методах компьютерной графики, методах отображения пространственной модели.

По каждому признаку установлены классификационные группировки САПР. Коды каждой классификационной группировки отделяют друг от друга точкой. Коды классификационных группировок определяют принадлежность создаваемой системы к определенному подмножеству (классу) САПР. Коды классификационных группировок по признакам сложности объекта проектирования, уровню автоматизации проектирования, комплексности автоматизации проектирования и количеству выпускаемых документов определяют (до утверждения общепромышленных методик) по отраслевым нормативно-техническим документам.

На рис. 5.2 представлена отечественная классификация САПР.

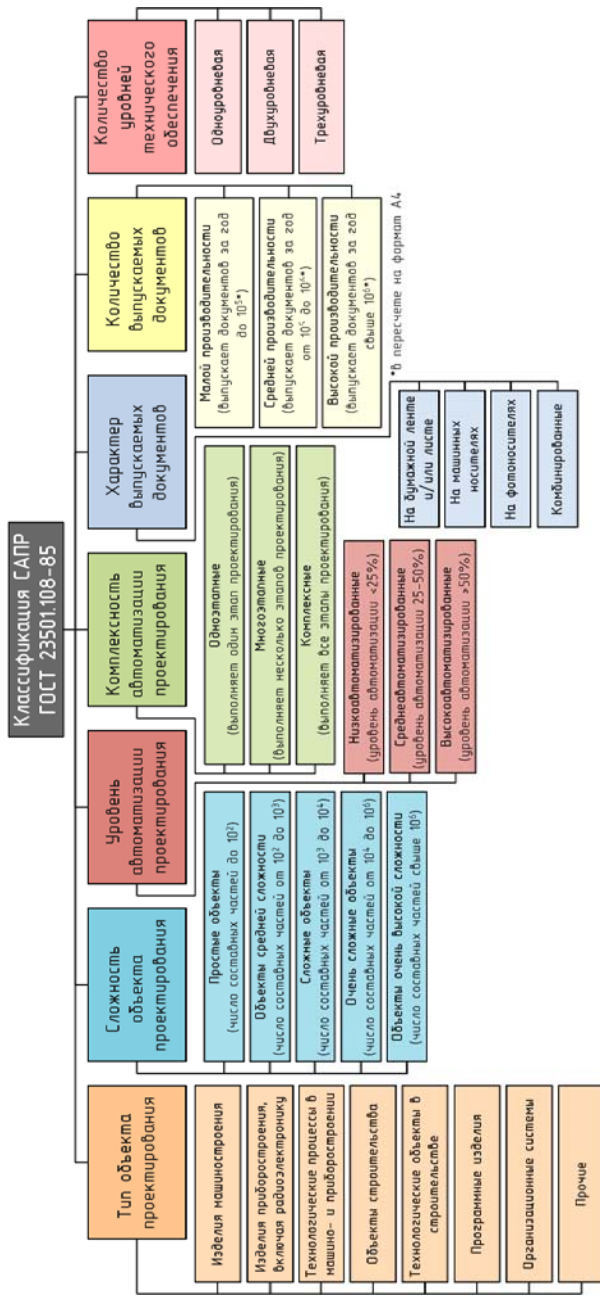


Рис. 5.2. Отечественная классификация САПР по ГОСТ 23501.108-85

Зарубежная классификация САПР

САПР по зарубежной классификации разделяются по отраслевому обозначению и целевому назначению.

Классификация **по отраслевому назначению**:

- **MCAD** (англ. *mechanical computer-aided design*) – автоматизированное проектирование механических устройств. Это машиностроительные САПР, они применяются в автомобилестроении, судостроении, авиакосмической промышленности, производстве товаров народного потребления, включают в себя разработку деталей и сборок (механизмов) с использованием параметрического проектирования на основе конструктивных элементов, технологий поверхностного и объемного моделирования (SolidWorks, Autodesk Inventor, КОМПАС, САТИА);

- **EDA** (англ. *electronic design automation*) или **ECAD** (англ. *electronic computer-aided design*) – САПР электронных устройств, радиоэлектронных средств, интегральных схем, печатных плат и т.п. (Altium Designer, OrCAD);

- **AEC CAD** (англ. *architecture, engineering and construction computer-aided design*) или **CAAD** (англ. *computer-aided architectural design*) – САПР в области архитектуры и строительства. Используются для проектирования зданий, промышленных объектов, дорог, мостов и пр. (Autodesk Architectural Desktop, Piranesi, ArchiCAD).

По целевому назначению различают САПР:

- **CAD** (англ. *computer-aided design/drafting*) – средства автоматизированного проектирования; термин обозначает средства САПР, предназначенные для автоматизации двумерного и / или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и / или технологической документации и создания цифровой модели изделия, САПР конструктора.

- **CADD** (англ. *computer-aided design and drafting*) – проектирование и создание чертежей.

- **CAGD** (англ. *computer-aided geometric design*) – геометрическое моделирование.

- **CAE** (англ. *computer-aided engineering*) – средства автоматизации инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Осуществляют динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий; решают задачи прочностного анализа, теплофизических и гидродинамических расчетов, анализа пластической

деформации и механического анализа (моделирование и прогнозирование поведения и движения механических систем) и др.

- САА (англ. *computer-aided analysis*) – подкласс средств САЕ, используемых для компьютерного анализа.

- САМ (англ. *computer-aided manufacturing*) – средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивают автоматизацию программирования и управления оборудованием с ЧПУ или ГАПС. САПР технолога. Русский аналог термина – АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства.

- САРР (англ. *computer-aided process planning*) – средства автоматизации планирования технологических процессов применяемые на стыке систем САД и САМ.

CALS-технологии (*Continuous Acquisition and Life cycle Support*) – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделия.

PLM (*Product Lifecycle Management*) – процесс управления информацией об изделии на протяжении всего его жизненного цикла.

PLM структурно включают в себя **PDM (*Product Data Management* – система управления данными об изделии)** – организационно-технические системы, обеспечивающие управление информацией об изделии.

Реализация CALS-технологий предполагает организацию единого информационного пространства, объединяющего автоматизированные системы, предназначенные как для эффективного решения задач инженерной деятельности, так и для планирования и управления производством и ресурсами предприятия.

Управление данными в едином информационном пространстве на протяжении всех этапов жизненного цикла изделий возлагается на систему PLM. Поэтому PLM можно считать средством практической реализации CALS.

PLM являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют различные автоматизированные системы многих предприятий.

PDM-системы интегрируют информацию любых форматов и типов, предоставляя её пользователям уже в структурированном виде. С помощью PDM можно создавать отчеты о конфигурации выпускаемых систем, маршрутах прохождения изделий, частях или дета-

лях, а также составлять списки материалов. Все эти документы могут отображаться на экране производственной или конструкторской системы из одной и той же БД.

Наиболее известными PDM-системами являются ENOVIA и SmarTeam (Dessault Systemes), Teamcenter, Windchill, mySAP PLM (SAP), VaanPDM, Лодман: PLM, PDM StepSuite, Party Plus.

Состав и структура САПР

В соответствии с ГОСТ 23501.101–87 в структуре САПР выделяют следующие элементы: КСАП САПР – совокупность КСАП различных подсистем:

подсистемы САПР – при помощи специализированных комплексов средств решается функционально законченная последовательность задач САПР с получением соответствующих проектных решений и проектных документов;

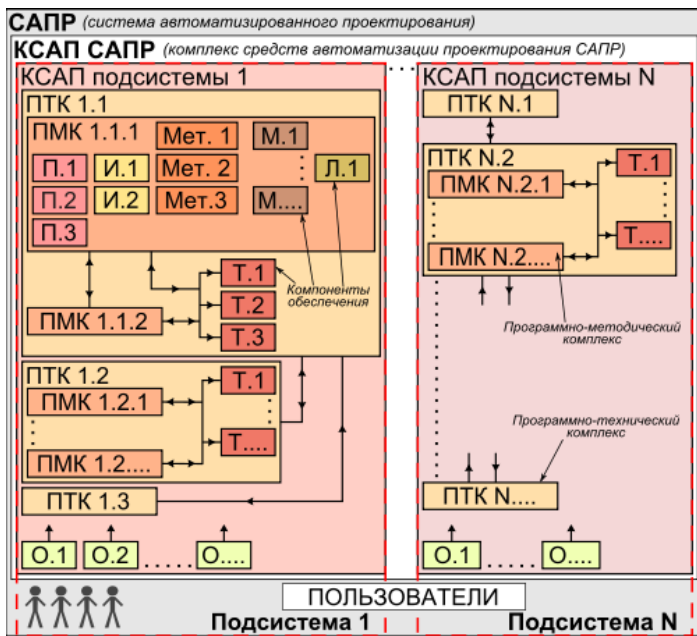


Рис. 5.3. Состав и структура САПР

- КСАП подсистемы САПР – совокупность ПМК, ПТК и отдельных компонентов обеспечения САПР, не вошедших в программные комплексы, объединенная общей для подсистемы функцией;
- ПТК – программно-технические комплексы;
- компоненты обеспечения ПТК САПР;
- ПМК – программно-методические комплексы;
- компоненты обеспечения ПМК САПР;
- компоненты обеспечения САПР, не вошедшие в ПМК и ПТК.

Виды подсистем по назначению показаны на рис. 5.4.

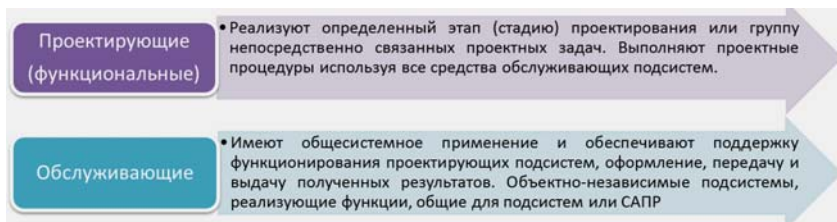


Рис. 5.4. Виды подсистем по назначению

Примеры проектирующих подсистем:

- подсистема эскизного проектирования;
- подсистема проектирования корпусных деталей;
- подсистема проектирования технологических процессов механической обработки;
- подсистема проектирования сборочных единиц;
- подсистема проектирования деталей;
- подсистема проектирования схемы управления;
- подсистема геометрического трехмерного моделирования механических объектов;
- подсистема технологического проектирования.

Примеры обслуживающих подсистем:

- автоматизированный банк данных;
- подсистема документирования;
- подсистема графического ввода-вывода;
- подсистемы управления проектными данными;

- обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

Виды проектирующих подсистем по функциональному значению представлены на рис. 5.5.

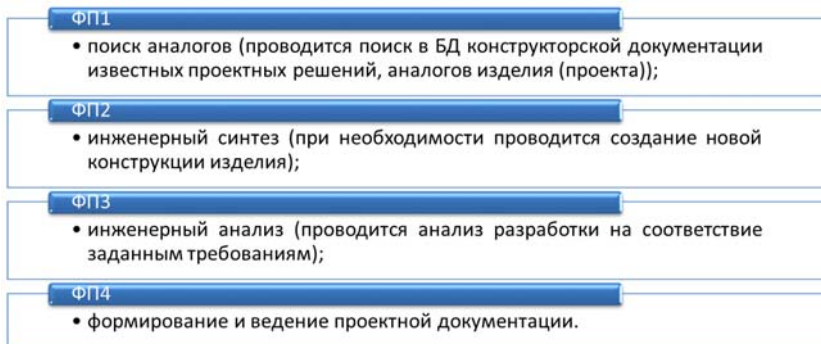


Рис. 5.5. Виды проектирующих подсистем по функциональному значению

Виды проектирующих подсистем по отношению к объекту проектирования представлены на рис. 5.6.

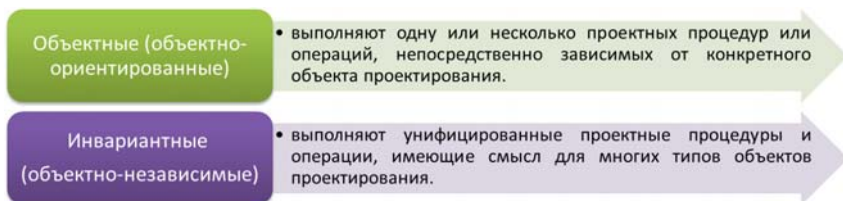


Рис. 5.6. Виды проектирующих подсистем по отношению к объекту проектирования

Виды обеспечения САПР

Подсистемы состоят из компонентов (наименьших неделимых элементов, выполняющих определённую функцию), обеспечивающих функционирование подсистемы. Совокупность однотипных компонентов образует средство обеспечения САПР.

Виды обеспечения САПР показаны на рис. 5.7.

Программное	• Совокупность всех программ и эксплуатационной документации.
Информационное	• Данные, используемые проектировщиками непосредственно для выработки проектных решений в процессе проектирования.
Методическое	• Документы, регламентирующие порядок эксплуатации, описание технологии функционирования САПР, технологических приемов.
Математическое	• Математические методы, модели объектов и процессов проектирования, алгоритмы решения задач проектирования.
Лингвистическое	• Языки проектирования, представляющие объекты, процессы, средства проектирования и диалог проектировщик-компьютер.
Техническое	• Совокупность связанных и взаимодействующих технических средств, обеспечивающих процесс проектирования.
Организационное	• Совокупность документов, определяющих состав проектной организации, связь между подразделениями, деятельность САПР.

Рис. 5.7. Виды обеспечения САПР

Программное обеспечение – совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования (рис. 5.8).



Рис. 5.8. Программное обеспечение

Информационное обеспечение – данные, которыми пользуются проектировщики в процессе проектирования непосредственно для

выработки проектных решений. Данные могут быть представлены в виде документов на различных носителях, содержащих сведения справочного характера о материалах, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений.

Методическое обеспечение – документы, регламентирующие порядок эксплуатации, описание технологии функционирования САПР, методов выбора и применения пользователями технологических приемов для получения конкретных результатов. Документы, относящиеся к процессу создания САПР, не входят в состав методического обеспечения.

Математическое обеспечение – математические методы, модели объектов и процессов проектирования, алгоритмы решения задач проектирования, т.е. принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиски экстремума и др.

По назначению и способам реализации математическое обеспечение делят на две части:

- математические методы и построенные на них математические модели;
- формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Лингвистическое обеспечение – специальные языковые средства (языки проектирования), используемые для представления информации о проектируемых объектах, процессе и средствах проектирования, а также для осуществления диалога проектировщик–компьютер и обмена данными между техническими средствами САПР.

К компонентам лингвистического обеспечения относят языки проектирования, информационно-поисковые языки и вспомогательные языки, используемые в обслуживающих подсистемах и для связи с ними проектирующих подсистем.

Техническое обеспечение – это совокупность связанных и взаимодействующих технических средств, облегчающих процесс автоматизированного проектирования.

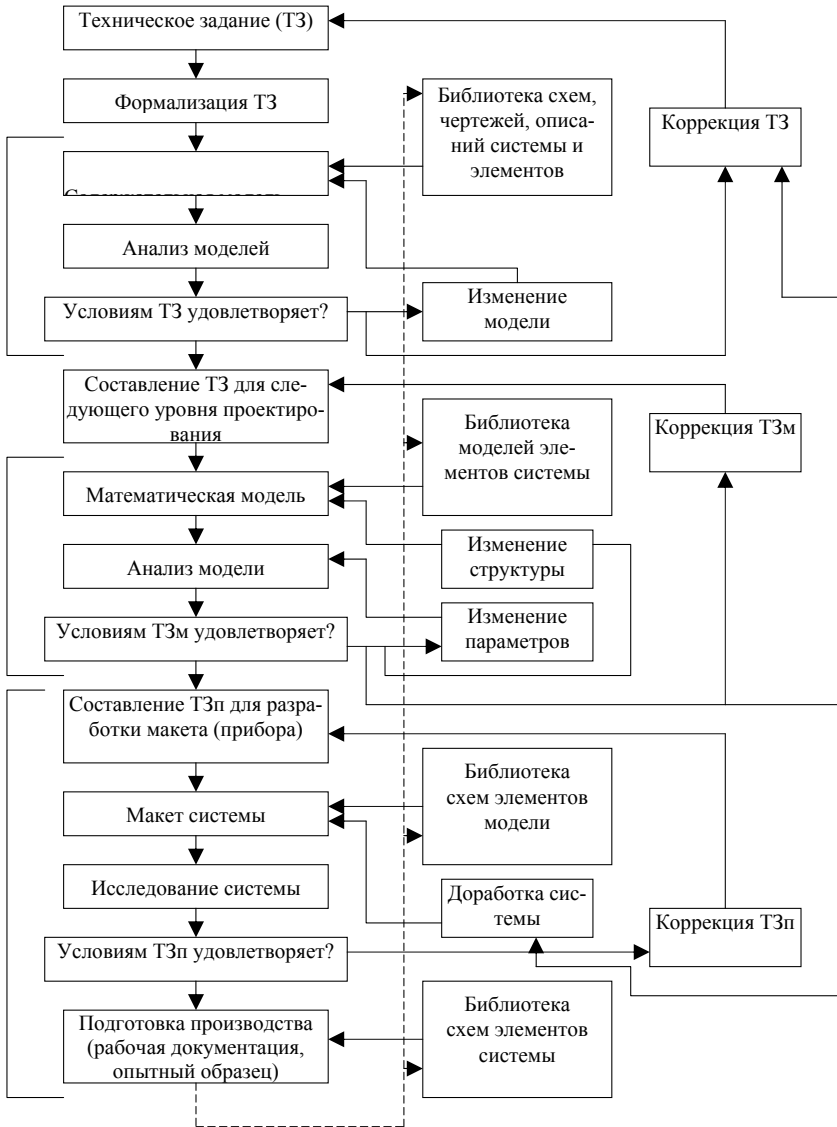


Рис. 5.9. Структурная схема САПР ИУС

К компонентам технического обеспечения относят устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства и их сочетания, обеспечивающие функционирование ПТК и КСАП, в том числе диалоговый, многопользовательский и многозадачный режим работы, а также построение иерархических и сетевых структур технического обеспечения.

В качестве предпочтительной для САПР следует использовать двухуровневую структуру технического обеспечения, включающую центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места (терминальные станции).

Организационное обеспечение – совокупность документов, определяющих состав проектной организации, связь между подразделениями, организационную структуру объекта и системы автоматизации, деятельность в условиях функционирования системы, форму представления результатов проектирования, задачи и функции службы САПР и связанных с нею подразделений проектной организации; права и ответственность должностных лиц по обеспечению создания и функционирования САПР; порядок подготовки и переподготовки пользователей САПР.

В организационное обеспечение входят штатные расписания, должностные инструкции, правила эксплуатации, приказы, положения и т.п.

Обобщая результаты по моделированию и проектированию ИУС, предложим схему САПР ИУС, изображенную на рис. 5.9. Эта схема представляет собой итерационный процесс. Проектирование ИУС – это совокупность задач синтеза (выбор структуры и численных значений параметров разрабатываемых систем) и анализа (исследования синтезированной системы). Этап синтеза ИУС может повторяться, если будут отрицательны результаты анализа. В случае удовлетворительного результата итерационного процесса на данном этапе детализации процесс проектирования переходит на следующий уровень проектирования.

На каждом уровне проектирования составляется модель ИУС, воплощенной в форме, отличной от действительной. Модели могут быть представлены в виде абстрактных математических формул (аналитическое моделирование), алгоритмов, позволяющих имити-

ровать функционирование ИУС на ЭВМ (машинное моделирование), копий или макетов (физическое моделирование).

Процесс проектирования можно условно разделить на три этапа: верхний, нижний и промежуточный. На первом (верхнем) этапе проектирования ИУС модель зрительной системы представляется в виде содержательной модели, которая может описываться на естественном языке, поясняться схемами, эскизами, рисунками, чертежами, таблицами, графиками. Таким образом, содержательная модель представляется на одном из «входных» языков САПР ИУС. При этом техническое задание необходимо формализовать – привести к характеристикам, параметрам и выражениям, понятным САПР ИУС.

Второй уровень проектирования – уровень уточнения и параметризации модели. Этот уровень проектирования называют также уровнем синтеза математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов (чисел, переменных векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, адекватно отражающую существование с позиций проектировщика свойства зрительной системы. Поскольку среди вариантов структуры ИУС часто ищется наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией, а расчет параметров, оптимальных с позиции некоторого критерия при заданной структуре ИУС, называют параметрической оптимизацией.

Если информативность содержательной модели окажется недостаточной для построения математической модели, то следует вернуться на первый уровень проектирования и декомпозировать содержательную модель по подсистемам проектируемой ИУС. При выборе содержательной модели и структурном синтезе ИУС следует использовать функционально-стоимостный анализ, являющийся комплексным методом, позволяющим спроектировать оптимальный вариант структуры изделия [4]. Синтез математической модели можно производить известными методами, используемыми в САПР [1]. Второй этап проектирования ИУС заканчивается составлением технического задания (ТЗм) для следующего этапа проектирования ИУС.

Третий (нижний) уровень проектирования должен содержать разработку ИУС и заканчиваться этапом подготовки производства. В случае необходимости техническое задание на разработку макета (ТЗп) может корректироваться по результатам его испытания. На

этом этапе проектирования могут использоваться известные подсистемы САПР блоков ИУС.

Следует еще раз отметить, что по результатам каждого уровня проектирования могут корректироваться (уточняться) технические задания на данный этап либо общее ТЗ на разработку ИУС (если это допустимо). После испытания макета и создания опытного образца проводится коррекция (исправление и дополнение) библиотек этапов. На рис. 5.9 это воздействие показано пунктирной линией.

Если произведен выбор содержательной модели, осуществлена структурная и параметрическая оптимизация ИС, то следует установить основные параметры ИС и разработать методику расчета зрительной системы.

5.3. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания ИУС

Рассмотрим вопросы применения функционально-стоимостного анализа (ФСА) для разработки ИУС, используя результаты, изложенные в [4, 6]. НИР по разработке ИУС является сложной (комплексной) задачей, включающей в себя следующие основные вопросы: выбор метода анализа информации, обоснование и выбор оптимального варианта структуры зрительной системы, оценка необходимых параметров всех элементов разрабатываемых конструкций.

Указанная многоцелевая задача предполагает достижение конечной цели путем поэтапного применения различных методов ФСА (рис. 5.10). ФСА на ранних этапах НИР (техническое задание и техническое предложение) направлен на выявление и выбор наиболее предпочтительного из всех альтернативных вариантов технических решений. Из-за отсутствия достоверной технической и стоимостной информации об элементах структуры ИУС представляется целесообразным использовать в основе ФСА методы прогнозирования и экспертные методы [4].

При этом для достаточного выбора приемлемого варианта структуры ИУС можно использовать такой обобщающий критерий в качестве оценочного показателя каждого варианта технического решения,

как условно названный показатель интегрального качества – функция потребительской стоимости проектируемого объекта.

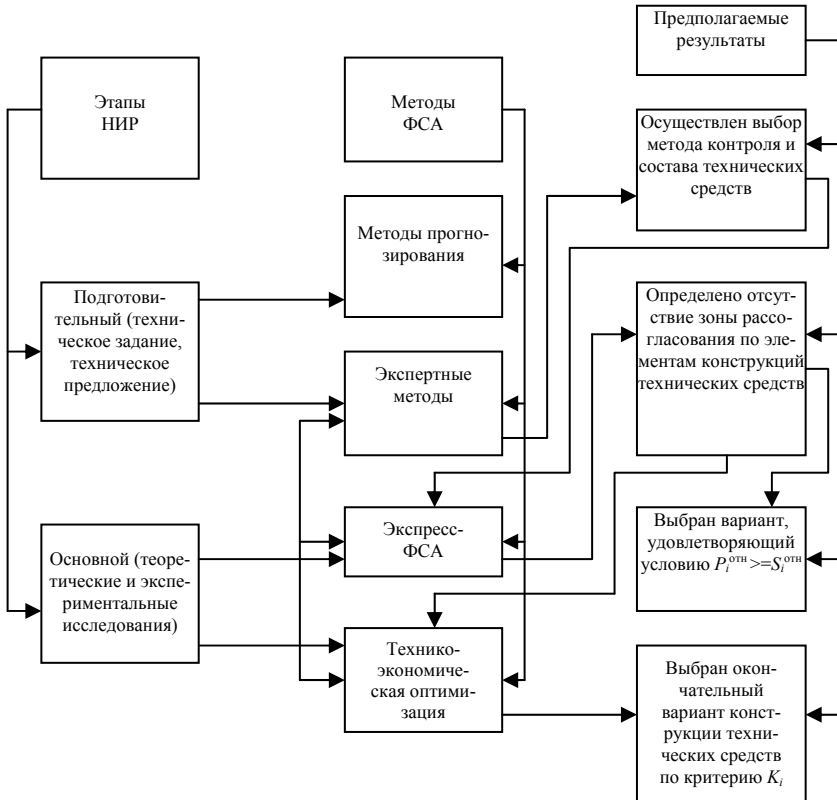


Рис. 5.10. Схема применения методов ФСА по этапам НИР

Так как абсолютный расчет потребительской стоимости ИУС на ранних стадиях проектирования затруднен, его можно заменить расчетом комплексного показателя качества, представляющего собой сумму произведений значимости каждого из основных для данной ИУС свойств (показатель качества) на оценку величины этого свойства (степень удовлетворения свойства) в рассматриваемом варианте.

Для выбора окончательного варианта ИУС могут быть использованы разнообразные экспертные методы [4].

На последующих этапах НИР (теоретическое и экспериментальное исследования) из-за недостаточного объема информации проектируемой ИУС может осуществляться по упрощенной схеме, т.е. по более укрупненным этапам, представленным на рис. 5.10. В этом случае предусматривается использование экспертных оценок наряду с, конкретными значениями технико-эксплуатационных и экономических показателей. Более полная схема проведения ФСА, осуществляемая при наличии достаточного объема достоверной информации о проектируемой ИУС, позволяет проводить детальный анализ технического решения с целью выбора оптимального варианта проектирования на основе функционально-аналитического анализа вариантов ИУС.

Отметим, что, хотя такой детальный экономический анализ экономит затраты на изготовление изделия, однако он (анализ) может существенно увеличить трудоемкость и длительность процесса проектирования ИС. В то же время главная и принципиальная особенность экономической работы в процессе ФСА – это оперативность выполнения всех необходимых расчетов.

Таким образом, комплексный многоцелевой экономический анализ, последовательно выполняемый на всех этапах НИР, отражает глобальный подход при нахождении оптимального варианта реализации любого многокомпонентного технического задания. Этот анализ является более эффективным по сравнению с локальным анализом, используемым для отдельных этапов НИР, так как дает возможность осуществлять единый системный подход при выборе средств обеспечения потребительских свойств окончательного варианта проектируемой ИС. Комплексный ФСА позволяет выявить механизм формирования издержек по мере реализации выбранного варианта и на этой основе определить задачи по дальнейшему поиску оптимального соотношения между потребительскими свойствами и затратами на их осуществление.

5.3.1. Функционально-стоимостный анализ на ранних этапах научно-исследовательской работы

Наличие информационной неопределенности в процессе поиска наилучшего варианта структуры ИС обуславливает невозможность

использования в процессе ФСА формализованных методов оценки. Для снижения субъективизма и повышения достоверности таких оценок может быть использован метод расстановки приоритетов [4].

Суть этого метода заключается в расположении группы изделий в некоторый ряд по возрастанию или убыванию степени выраженности одного или нескольких признаков (критериев), соответствующих этим изделиям. При этом предполагается, что численное значение степени выраженности признака неизвестно для одного или для всех изделий и преодоление этой неизвестности традиционными методами невозможно или требует значительных затрат труда, времени и ресурсов.

Алгоритм проведения ФСА, реализующий метод расстановки приоритетов, состоит из следующих основных этапов [Там же].

1. Выбор и обоснование количества сравниваемых вариантов изделий $Y_1^{pn}, Y_2^{pn}, \dots, Y_n^{pn}$.

2. Определение системы параметров для характеристик основных функций проектируемого изделия $X_1^{pn}, X_2^{pn}, \dots, X_n^{pn}$.

3. Составление системы сравнения по каждому параметру изделия.

4. Построение матрицы предпочтительности с целью оценки приоритета выбранных параметров X^{pn} .

5. Получение системы вариантов для сравнения их между собой по каждому параметру X_m^{pn} .

6. Определение комплексного показателя качества каждого альтернативного варианта технического решения.

Рассмотрим кратко изложенный алгоритм расстановки приоритетов применительно к ИС [4, 6].

При выборе количества сравниваемых вариантов ИС $Y_1^{pn}, Y_2^{pn}, \dots, Y_n^{pn}$ необходимо руководствоваться такими общими соображениями, как выбор метода формирования текущего изображения (телевизионный, оптический, оптико-локационный, магнитоэлектрический и т.п.), определяющего структуру зрительной системы.

Система параметров $X_1^{pn}, X_2^{pn}, \dots, X_n^{pn}$ должна адекватно со-

ответствовать необходимым требованиям, предъявляемым техническим заданием на разработку ИС. Например, система параметров должна отражать точность (погрешность), быстродействие и надежность оценки параметров, объем обрабатываемой информации.

При составлении системы сравнения по каждому параметру эксперты должны независимо сравнить эти параметры между собой. В процессе сравнения оценивают преимущества одного варианта перед другим (более важен, менее важен, равноценен), определяют отношения между ними знаками $>$, $<$ или $=$. Далее строится матрица предпочтительности $A = |a_{ij}|$, в которой коэффициент предпочтительности a_{ij} является числовой мерой (не баллом) – аналогом нашего представления о предпочтении одного из сравниваемых вариантов ИС по какому-то критерию другому варианту ИС.

Коэффициент a_{ij} обладает следующими известными свойствами: 1) сумма коэффициентов предпочтительности двух сравниваемых ИС принимается равной двум, $a_{ij} + a_{ji} = 2$; 2) коэффициенты располагаются симметрично относительно единицы:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 + y, & \text{при } x_i > x_j; \\ 1, & \text{при } x_i = x_j; \\ 1 - y, & \text{при } x_i < x_j, \quad \text{где } a \leq y \leq 1. \end{cases} \quad (5.1)$$

Формула для определения y имеет следующий вид:

$$y = \left(\frac{K_p - 1}{K_p + 1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}} \right), \quad (5.2)$$

где m – число оцениваемых объектов, K_p – коэффициент отношения крайних членов предварительно ранжированного (экспертным путем) ряда. Коэффициент a_{ij} может принимать значения:

1,9; 1,8; 1,7; 1,6; 1,5; 1,4; 1,3; 1,2; 1,1, при $x_i > x_j$;
 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0, при $x_i = x_j$;
 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9, при $x_i < x_j$.

Особенности применения данного метода показывают целесообразность использования следующих значений коэффициентов предпочтительности a_{ij} :

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 1,5, \text{ при } x_i > x_j; \\ a_{ij} &= 1,0, \text{ при } x_i = x_j; \\ a_{ij} &= 0,5, \text{ при } x_i < x_j; \end{aligned}$$

Результаты сравнения параметров сведены в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Пример усредненных суждений, высказанных пятью экспертами

Параметры	Экспертиза					Итоговая оценка при сравнении	Числовое значение итоговой оценки
	1	2	3	4	5		
X_1 и X_2	=	<	<	<	=	<	0,5
X_1 и X_3	>	>	>	>	>	>	1,5
X_1 и X_4	<	<	<	<	<	<	0,5
X_2 и X_3	>	>	>	>	>	>	1,5
X_2 и X_4	=	>	=	=	>	=	1,0
X_3 и X_4	>	>	>	>	>	>	1,5

Этап построения матрицы предпочтительности состоит из следующих операций:

- 1) введение в матрицу Ап выбранных количественных отношений между параметрами;
- 2) нахождение суммы a_{ij} по всем параметрам X_n^{pn} (определение абсолютного значения b_i каждого параметра);
- 3) оценка относительных значений отдельных анализируемых параметров

$$\rho_i^{pn} = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}; \quad (5.3)$$

- 4) вычисление абсолютного приоритета параметров

$$\rho_{ij}^{pn} = a_{i1}b_1 + a_{i2}b_2 + \dots + a_{in}b_n; \quad (5.4)$$

5) определение относительного приоритета параметров

$$c_i^{\text{отн}} = \frac{c_i^{pn}}{\sum_{i=1}^n c_{ij}^{pn}}. \quad (5.5)$$

Итеративный характер расчетов при выполнении четвертого этапа может быть представлен в виде табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Расчет приоритета параметров

$I \backslash J$	Параметры				1-й шаг		2-й шаг	
	X_1	X_2	X_3	X_4	$\sum a_{ij}$	ρ_i^{pn}	ρ_{ij}^{pn}	$\rho_i^{\text{отн}}$
X_1	1,0	0,5	1,5	0,5	3,5	0,22	13,25	0,21
X_2	1,5	1,0	1,5	1,0	5,0	0,31	19,5	0,314
X_3	0,5	0,5	1,0	1,5	3,5	0,22	13,75	0,22
X_4	1,5	1,0	0,5	1,0	4,0	0,25	16,0	0,256
					16,0	1,0	62,5	1,0

При получении системы вариантов для сравнения их между собой по параметру X_n^{pn} необходимо выполнить следующие операции:

1) составление системы сравнения вариантов ИС по первому параметру X_1^{pn} ;

2) составление таблицы в виде матрицы предпочтительности по параметру X_1^{pn} ;

3) выполнение операции согласно четвертому этапу;

4) строятся матрицы предпочтительности и производятся вычисления по второму (X_2^{pn}), третьему (X_3^{pn}) и другим (X_n^{pn}) параметрам.

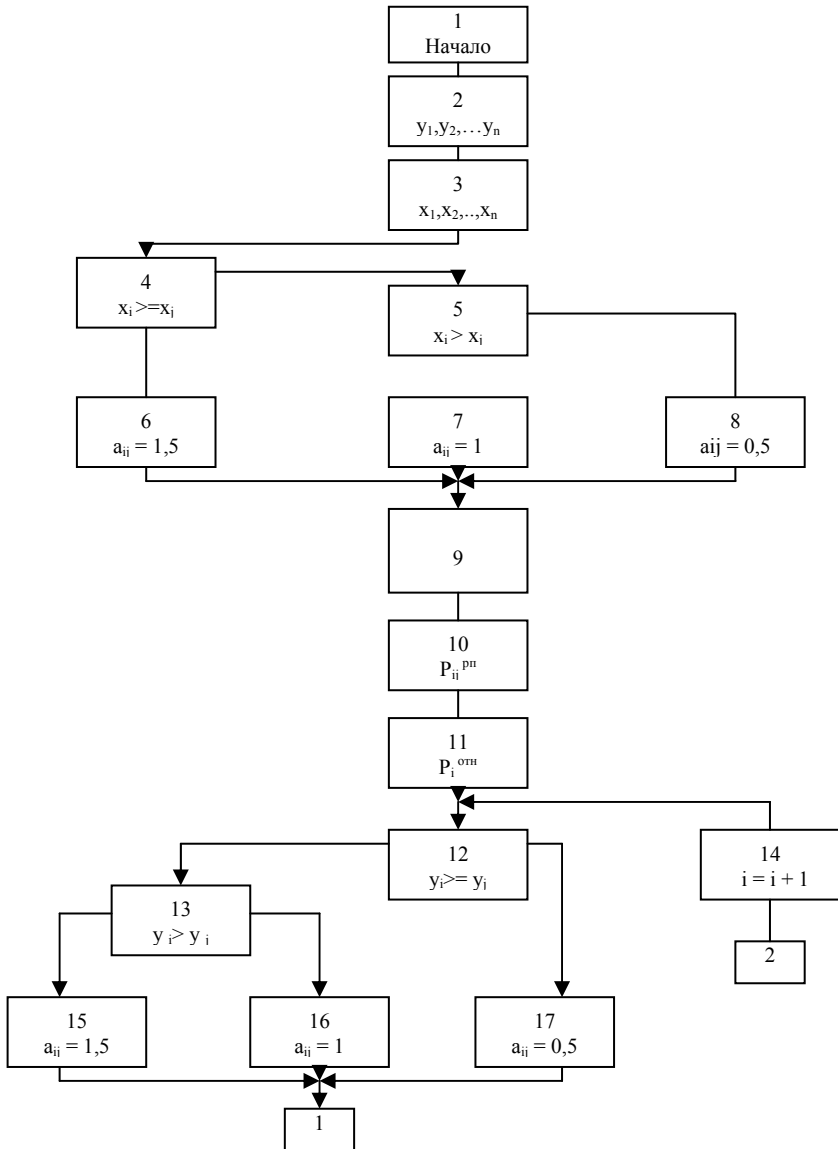


Рис. 5.11 (начало)

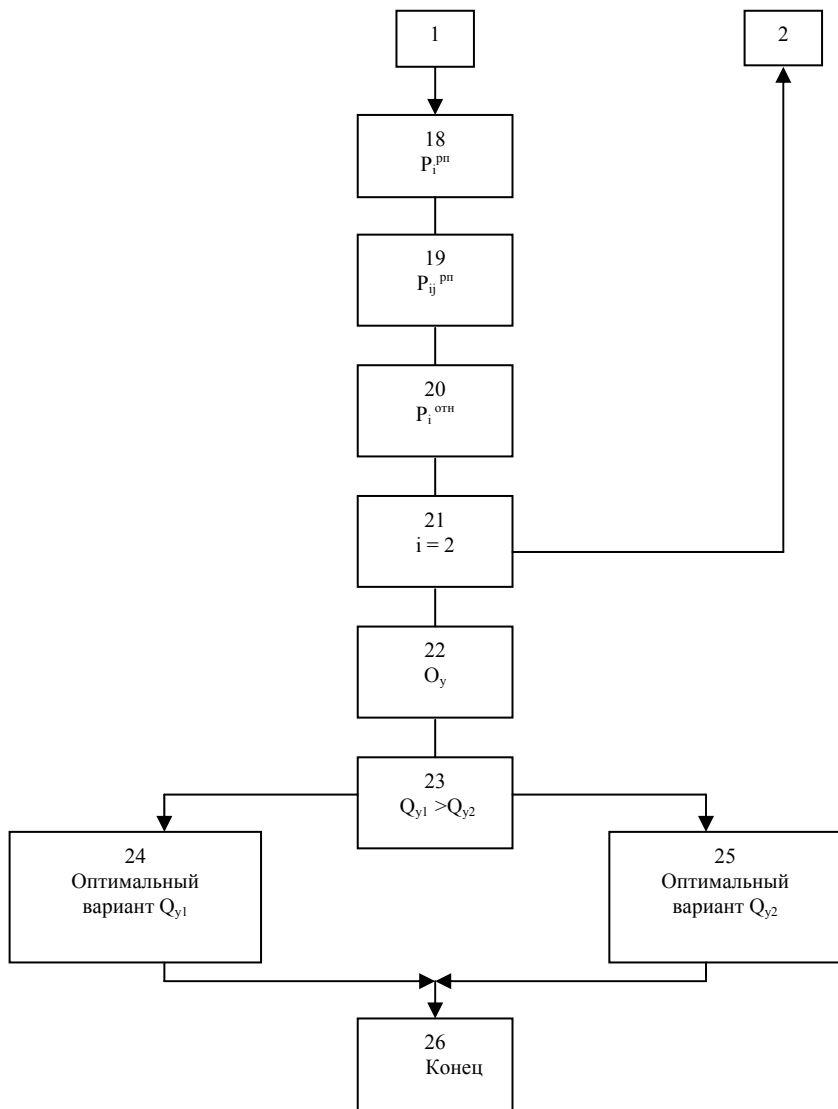


Рис. 5.11 (окончание). Блок-схема алгоритма расстановки приоритетов

В результате выполнения этого этапа определяется абсолютный и относительный приоритет вариантов проектирования новой ИС по каждому из выбранных для его характеристики параметров X_n^{pn} .

Заключительной операцией этапа является операция свертывания полученных частных критериев – составление суммарного ряда, характеризующего каждый из анализируемых вариантов.

Обобщенная качественная оценка любого варианта ИС определяется следующим образом:

$$Q_y = \sum_{i=1}^m \rho_i^{\text{отн}} \rho_{yi}^{\text{отн}}, \quad (5.6)$$

где $\rho_{yi}^{\text{отн}}$ – уровень значимости выбранного для анализа параметра X по рассматриваемому варианту Y .

Максимальное значение полученного комплексного показателя Q_y является основанием для выбора наиболее предпочтительного варианта проектирования ИУС.

Блок-схема рассмотренного алгоритма представлена на рис. 5.11.

Таким образом, специфика применения ФСА на ранних этапах НИР проявляется в определении обобщающей качественной оценки для характеристики альтернативных вариантов ИС и выбора наиболее предпочтительного из них. Методический подход по применению ФСА предполагает выполнение двух укрупненных этапов анализа: на первом этапе определяется уровень значимости параметров, выбранных для характеристики анализируемого объекта, на втором этапе – приоритет предлагаемого варианта ИС по каждому из параметров и количественная оценка всех вариантов.

5.3.2. ФСА на основных этапах научно-исследовательской работы

Экспресс-ФСА, представляющий собой упрощенный вариант ФСА, позволяет оперативно (быстро) проверить выбранный вариант ИС на оптимальность (например, в смысле простоты реализации, малых весогабаритных характеристик или высокой надежности).

Методика проведения экспресс-ФСА базируется на определении зависимости между функциями проектируемой ИС и затратами на ее создание [4].



Рис. 5.12. Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА

Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА дана на рис. 5.12 [4]. Кратко рассмотрим этот алгоритм. После выбора варианта ИС (1-й этап алгоритма) экспресс-анализ начинается с составления структурно-

элементной модели, отражающей многоуровневую связь между его составными частями (структурными элементами). Пример такой модели показан на рис. 5.13, где $CЭ_1$, $CЭ_2$, $CЭ_3$, ..., $CЭ_{422}$ обозначены структурные элементы ИС.

На 3-м этапе алгоритм ФСА представляет собой функциональное моделирование, сущность которого состоит в представлении ИС в виде совокупности внешних и внутренних функций и выявлении их связей на основе функционального подхода. Этап функционального моделирования состоит из следующих операций: формулирование функций, группировка и определение иерархий функций, графическое изображение функций и связей между ними в виде функциональной модели.

При формировании функций структуры ИС каждой функции присваивается свой индекс, отражающий принадлежность к определенному иерархическому уровню модели, и порядковый номер. Функциональная модель – это логико-графическое представление состава и взаимосвязей функций ИС. Исходной информацией для построения функциональной модели служит структурно-элементная модель. Структурная схема функциональной модели дана на рис. 5.14.

Алгоритм функционального моделирования включает в себя следующие операции: формирование внешней (главной) функции F^T (верхний уровень модели), синтез основных функций F^o и вспомогательных функций F^b объекта. Таким образом, сущность функционального моделирования заключается в последовательном выведении функций определенного уровня из функций предыдущего уровня. То есть функции верхнего иерархического уровня будут являться отражением целей для функции нижестоящего уровня, которые, в свою очередь, являются средством обеспечения для функций вышестоящего уровня.

При построении функциональной модели изделия необходимо учесть принцип сбалансированности количественных характеристик функций каждого последующего и предыдущего уровней. Данное условие характеризует функциональную модель как систему, имеющую прямые и обратные связи.

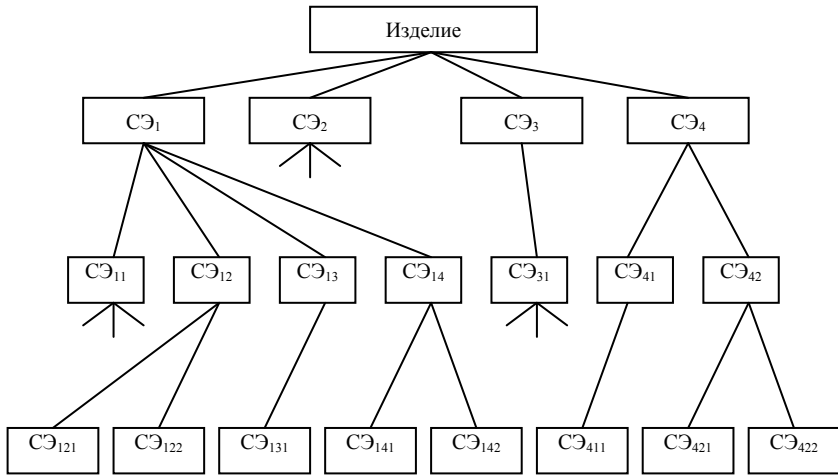


Рис. 5.13. Структурно-элементарная модель

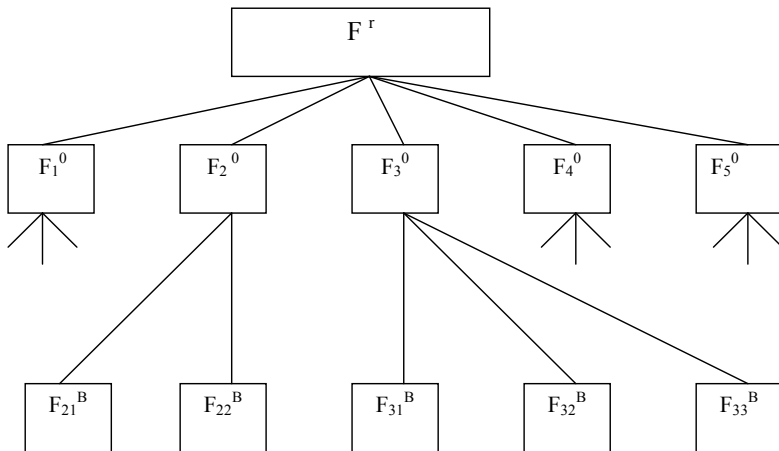


Рис. 5.14. Укрупненная функциональная модель

Отметим, что максимально возможную степень детализации функций следует использовать при проведении корректирующей формы ФСА, когда каждая функция по уровням модели должна

дифференцироваться до простейших функций, не требующих дальнейших действий для своей реализации.

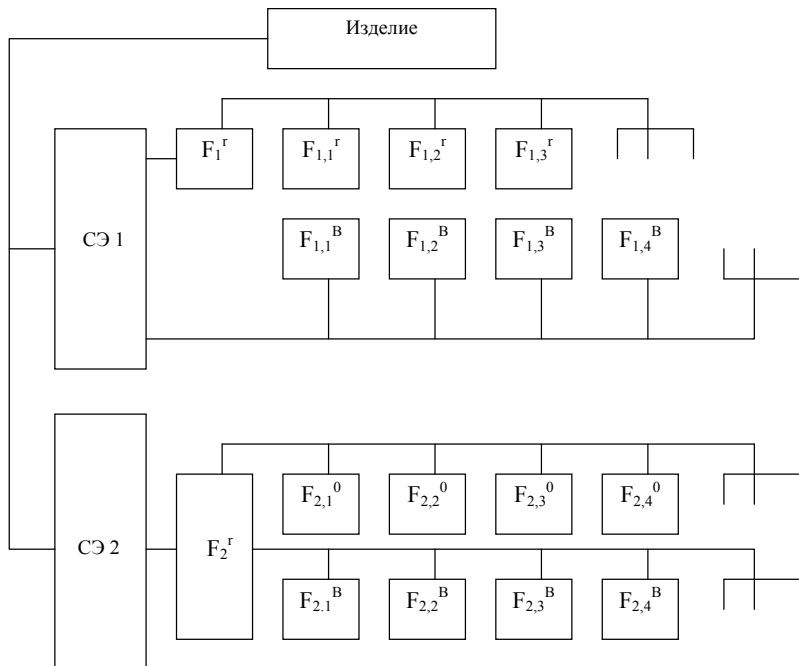


Рис. 5.15. Функционально-структурная модель

Кроме отдельного структурного и функционального описания ИС, при проведении ФСА требуется их совместный анализ с помощью функционально-структурной модели, на основании которой определяются функциональность и полезность материальных элементов ИС, распределение затрат по функциям и оценка качества их исполнения. Функционально-структурная модель строится путем «наложения» функциональной модели на структурную. Графическое изображение изделия, отражающее взаимосвязи элементов структурной и функциональной моделей, представлено на рис. 5.15 (на рисунке даны те же обозначения, что и на рис. 5.13, 5.14). Функционально-структурная модель может быть представлена в матричной

форме, где по строкам матрицы оставляются материальные элементы ИС, и по столбцам – его функции [4].

После этого дается оценка уровня значимости функций, необходимая для последующей увязки конструктивных и стоимостных параметров ИС с функциональными требованиями, предъявляемыми к ней. Значения коэффициента весомости, определяемые по уровням функциональной модели начиная с верхнего, устанавливаются экспертными методами по степени важности каждой функции для ИС в целом. Следует при этом учитывать, что сумма значений коэффициентов весомости, соответствующих функций данного уровня должна быть равна единице, а сами значения определяют частную весомость каждой функции ИС. Упрощение расчетов при проведении экспресс-ФСА достигается за счет выделения только главной или основной функции.

Затраты на реализацию функций соответствуют материальным затратам, носителями которых являются структурные элементы ИС. Различают такие категории затрат на функции, как автономные и долевые.

Автономные затраты, предполагающие выполнение только одной функции каким-либо структурным элементом, определяются следующим образом:

$$S_{Fj} = S_{mnij}, \quad (5.7)$$

где S_{mnij} – затраты на i -й материальный носитель j -й функции ИС.

Если группа материальных носителей полностью обеспечивает определенную функцию, то автономные затраты находятся из

$$S_{Fj} = \sum_{i=1}^p S_{mnij}, \quad (5.8)$$

где p – число материальных носителей j -й функции.

5.3.3. Функционально-стоимостный анализ при оптимизации структуры ИУС

Обобщая вышеизложенное в п. 5.3.1 и 5.3.2, подчеркнем, что выбор конкретных методов ФСА на этапах НИР и ОКР при создании ИС должен обеспечивать следующие требования: быть относительно простым применительно к получению оценки различных частных технических решений по этапам НИР; учитывать качественные различия в сравниваемых вариантах; отражать вклад технических решений в обеспечение потребительских свойств и функций объекта разработки; обеспечивать объективность оценки в условиях ограниченной исходной информации.

Учитывая перечисленные выше требования, алгоритм поиска оптимального (например, в смысле минимума стоимости или максимума надежности) технического решения можно представить схемой, изображенной на рис. 5.16.

На первом этапе ФСА выбирается объект для анализа. В качестве критерия выбора объекта ФСА могут использоваться технические, эксплуатационные и экономические показатели, в большей мере определяющие основную цель проведения работ по созданию новых образцов ИС.

На втором этапе алгоритма при формировании дерева целей основываются на требованиях, сформированных в техническом задании. Реализация этого этапа предполагает наличие генеральной цели разработки ИС, являющейся отражением для целей нижестоящего уровня. В свою очередь предпосылкой и средством обеспечения по выполнению нижестоящих целей будет решение определенного ряда задач.

На третьем этапе ФСА строятся структурная и функциональная модели ИС, правила построения которых приведены в п. 5.3.2.

На четвертом этапе ФСА для ранжирования функций, раскрывающих сущность разрабатываемой ИС, и количественной оценки уровня их значимости может быть использован один из экспертных методов.

На пятом этапе ФСА используется метод морфологического ящика [4, 6], заключающийся в построении всех возможных вариантов реализации исследуемой ИС с целью определения возможных границ его изменения. В процессе использования этого метода сначала выявляются все альтернативные варианты реализации функ-

ций, а затем совокупность полученных вариантов сводится в морфологическую матрицу (морфологический ящик), в которой в строках размещается совокупность функций ИС, а в столбцах матрицы отражаются принципиальные решения функциональных подсистем (структурных элементов) ИС.

Пример такой морфологической матрицы дан в табл. 5.3 [4]. В морфологической матрице приведены 80 типовых вариантов (структурных решений) узлов ИС. Кратко поясним отдельные моменты использования таблицы. Например, при выборе седьмого морфологического признака (языка программирования) следует иметь в виду, что в списке исполнения указаны вначале аналоговые (или цифровые) сигналы, используемые в аналоговых и аналого-цифровых вариантах ИС, а затем – машинные коды (или язык Ассемблера), используемые при реализации цифровых ИС. Далее следуют универсальные языки высокого уровня. Заканчивается этот ряд специализированными языками высокого уровня.

Полный анализ ИС требует рассмотрения его взаимодействия с потребителем информации (например, роботом). Для этой цели вводится восьмой морфологический параметр – «тип робота и другие характеристики потребителя информации». Учет характеристик потребителя информации оказывает влияние на структуру (или в крайнем случае на выходной блок) ИС. Например, в случае применения ИС для очувствления робота первого поколения (программного, с позиционной системой управления) зрительная система должна иметь блоки связи с роботом, отличающиеся от соответствующих блоков связи ИС с интеллектуальным роботом. Это обусловлено прежде всего количеством и скоростью передачи информации ИС потребителю информации.

Технические решения из морфологической матрицы выбираются на основе их функциональной ценности путем выбора соответствующей клетки матрицы, находящейся на пересечении строк и столбцов и отражающей характеристики способов реализации или иных функций. Например, одно из возможных решений $1.3 \Rightarrow 2.4 \Rightarrow 3.6 \Rightarrow 5.5. \Rightarrow 5.10 \Rightarrow 6.7 \Rightarrow 7.7 \Rightarrow 8.5$ соответствует многопроцессорной ИС с телевизионным датчиком ТИ, предназначенной для контроля топологии печатных плат.

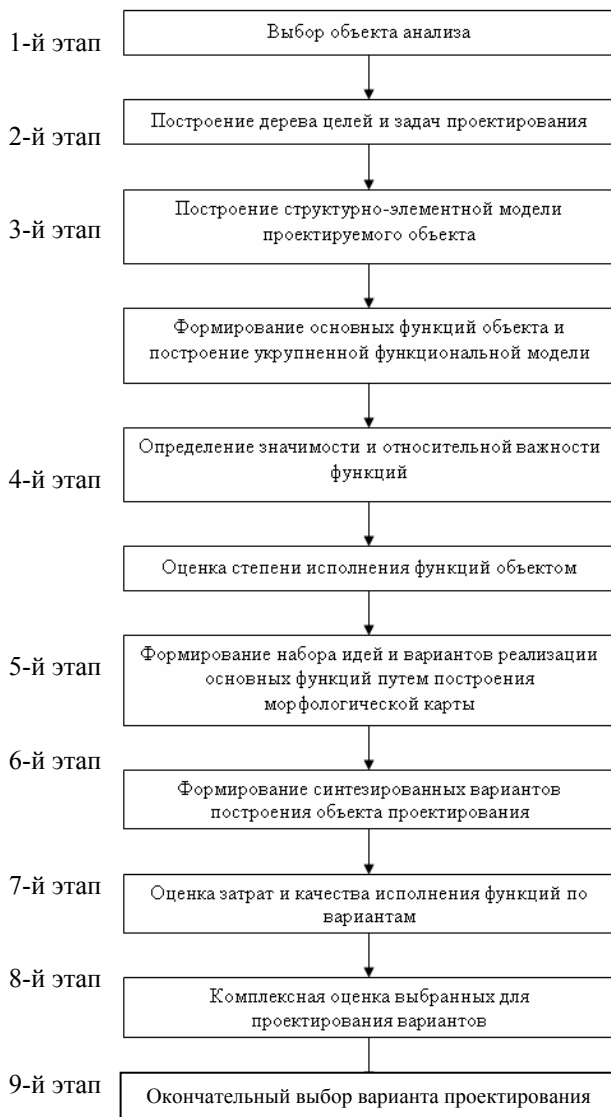


Рис. 5.16. Блок-схема алгоритма ФСА при решении оптимизационных задач

При использовании морфологической матрицы можно выявить неожиданные технические решения и принципиально новые задачи. В качестве примера рассмотрим техническую реализацию $1.9 \Rightarrow \Rightarrow 2.9 \Rightarrow 3.5 \Rightarrow 5.3. \Rightarrow 5.4 \Rightarrow 6.9 \Rightarrow 7.2 \Rightarrow 8.5$. Она соответствует ИС, обеспечивающей контроль качества монтажа навесными элементами (микросхемами, конденсаторами, резисторами), отличающимися друг от друга в основном по цвету. Такая ИС может содержать цветное телевизионное ТИ, формирователь ТИ и блок хранения ЭИ на оптическом управляемом транспаранте, причем формирователь и анализатор меры близости могут быть выполнены в виде оптического коррелятора цветных изображений или многоканального цифрового анализатора составляющих цвета. В этой ИС программы реализованы на языке Ассемблер, а для смещения электронной платы перед датчиком ТИ использован механизм сканирования. Таким образом реализуется шестой этап ФСА.

На седьмом этапе при оценке затрат на реализацию функций следует иметь в виду их разную природу возникновения, а следовательно, и разные методы расчета. Затраты, возникающие на этапах НИР по реализации ИС, относятся к капитальным (единовременным) и определяются стоимостью разработки корреляционной зрительной системы. Для упрощения расчета затрат на реализацию функции элемента ИС можно использовать «автономный» метод, допускающий такое упрощение, как выполнение материальным носителем только одной функции. На этом этапе ФСА необходимо также определить качество исполнения функций. Отметим, что показатели качества и показатели затрат являются чаще всего противоречивыми. Сведение этих противоречий к минимуму путем оптимизации соотношений составляет основную цель седьмого этапа ФСА.

Оценка степени исполнения функций дается в баллах, которые назначаются экспертным путем при сравнении вариантов ИС по следующей шкале: разрабатываемый вариант лучше – 3 балла, варианты равнозначны – 2 балла, разрабатываемый вариант менее удовлетворителен – 1 балл.

Для характеристики и последующего сравнения вариантов разработки ИС используются комплексные показатели качества, определяемые выражением (5.6).

Если в основе выбора окончательного варианта ИС использовать единство подхода только к стоимостной оценке различных вариан-

Таблица 5.3

Морфологическая матрица вариантов узлов (подсистем) ИС

Индекс параметра	Датчик ТИ	Вид исполнения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Характеристики рабочей зоны (РЗ) или объекта контроля (т.е. ОП)	Стационарная РЗ; ОП: металлургические	Подвижные конвейер; ОП: металлургические детали	Печатная плата, фотошаблон (топография)	Чертеж, схема, текст, шрифт, маркировка	Подвесной конвейер, крупнообаритные детали	РЗ оптического микроскопа; ОП: полупроводниковые кристаллы	Микросхема (топология)	РЗ станка с ЧПУ	Электронная плата с навесными элементами (цветными)	Электронный распылитель микроскопа		
	Морфологический признак (параметр)												
2		Оптический (объектив), черно-белый	Телевизионный (видимый), черно-белый	Телевизионный (инфра-красный), черно-белый	Радиолокационный	Опτικο-локационный, черно-белый	Стрекоподобный, черно-белый	Голографический, черно-белый	Цветной, оптический (объектив)	Цветной, телевизионный	Электронный распылитель микроскопа		

4	Блок хранения ЭИ	Формирователь ТИ
	Фотопленка	На ЭЛТ
	Маска	На ЗЭЛТ
	На оптически управляемом транспаранте	На ЗЭЛТ с электронным пово- ротом
	ОЗУ	На оптически управляемом транспаранте
	ППЗУ, ОЗУ	Устройство, комбинация ЗЭЛТ и оптического управ- ляемого транспаранта
	На ПЗС-линейке, регистре	Буферное ЗУ
	На ФД-линейке	ОЗУ
	На ПЗС-матрице	Электронный диск
	На ФД-линейке	На регистре ПЗС-линейки, ФД-линейки
	Электронный диск	На ПЗС-матрице, ФД-линейке

Продолжение табл. 5.3

1	5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	5	Формирователь меры близости	ОК Берджера, Ковашно-ва-Ардана, Майера-Эплера	Динамический оптический коррелятор	ОК с прозрачной пленкой фильтрацией помех	ОК анализа цветных изображений	Электронный коррелятор	ОК, формулирующие структурные функции	Цифровой параллельный видеопроектор	Цифровой цветной специпроцессор на универсальной микроЭВМ	Цифровой специпроцессор с «жесткой» структурой	Цифровой специпроцессор на универсальной микроЭВМ
		Анализатор меры близости	Понсковый аналоговый	Понсковый цифровой	Беспонсковый аналоговый	Беспонсковый цифровой	Аналоговый, адаптивный (перестраиваемый)	Цифровой, адаптивный (перестраиваемый)	Цифровой, параллельный видеопроектор	Многоканальный, аналоговый анализатор составляющих цвета	Цифровой (микропроцессорный) анализатор составляющих цвета	Цифровой (на универсальной микроЭВМ) анализатор составляющих цвета

∞	1 ил роботa (системы управления (СУ) робота) или другие характеристики потребности в информации	Язык программирования	Программный, позиционный (цифровые) сигналы, машинные коды	Программный, контурная (с «жесткой структурой») СУ	Программный, позиционный (на универсальной микроЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микроЭВМ) СУ	Программный, позиционный (программный, позиционный СУ на универсальной микроЭВМ)	Очувствительный (на основе ИИП), позиционная (на микропроцессоре СУ)	Очувствительный (на основе ТВС), позиционная (на микропроцессоре СУ)	Интеллектуальный (бноклассовая ИС), многопроцессорная СУ	Автомат (для раскраски), позиционная многопроцессорная СУ	Станок с ЧПУ (с управляющей микроЭВМ)
7		Асемблер	Бейсик	Квейсик	Фортран	Паскаль	Си	Ада	Лисп	ВАЛ		

тов, то они окажутся несопоставимыми по самым различным параметрам. Поэтому для повышения степени реальности стоимостной оценки могут быть введены поправочные коэффициенты, определяемые экспертным методом и учитывающие, например, возможное увеличение затрат на относительное снижение какого-либо параметра или модификации конструкции ИС, а также вероятность достижения требуемых параметров ИС при эксплуатации в реальных условиях.

На восьмом этапе ФСА изучаются возможные варианты ИС с точки зрения перспективности их конструктивно-технологических позиций и функциональной необходимости параметров проектируемой ИС, а также с учетом общей суммы финансирования данной разработки.

Экономический эффект от реализации какого-либо альтернативного варианта ИС образуется как сумма полезных действий множества элементов, представляющих этот объект НИР как систему. В итоге получается потребительская стоимость, имеющая качественно новые свойства.

При этом индивидуальные функционально необходимые издержки определяются по степени участия конкретного элемента в формировании результирующего полезного эффекта. Таким образом, применение системного, функционального и стоимостного подходов обуславливает синтез оптимального варианта ИС с учетом его целевой направленности.

На последнем (девятом) этапе ФСА критерием для окончательного выбора варианта проектируемой ИС являются минимум затрат на его разработку и коэффициент удельных затрат на единицу качества.

В заключение следует отметить, что описанная методика проведения ФСА создает основу для целенаправленного совершенствования объектов НИР. Например, выявление причинной обусловленности наличия избыточных параметров у материальных носителей конкретных функций будет указывать пути и средства для их исключения.

Далее сравнительный анализ затрат на реализацию функций определит технико-экономическую целесообразность принятых технических решений и направления их совершенствования. Наконец, исследование способов реализаций и создание множества альтернатив

по материальным носителям функций позволит сформулировать банк идей и технических решений ИС и «увязать» с их стоимостной оценкой, которые могут быть успешно использованы в дальнейшей научно-технической деятельности.

5.3.4. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании ИУС

5.3.4.1. Выбор способа контроля качества изделий на основе метода расстановки приоритетов

В настоящее время наиболее распространенными являются такие методы контроля качества изделий, как электрический, радиационный и оптический. Сложно сразу выбрать какой-либо один из методов для практического применения в разрабатываемой ИС. Поэтому возникает задача определения наиболее целесообразного из существующих методов контроля качества. Таким образом, объектами ФСА являются методы контроля, а цель проведения анализа заключается в обосновании выбора одной из альтернатив.

Для реализации сформулированной выше задачи целесообразно использовать один из методов экспертных оценок – метод расстановки приоритетов, алгоритм которого описан в 5.3.2.

Технику вычислений по методу расстановки приоритетов рассмотрим на следующем примере [4].

Допустим, что стоит задача выбора наиболее предпочтительного из всех существующих методов контроля качества печатных плат. Как уже указывалось, наиболее распространенными являются следующие методы: Y_1 – электрический; Y_2 – тепловой; Y_3 – радиационный; Y_4 – оптический.

Для характеристики выбранных методов контроля определим систему частных критериев: X_1 – степень универсальности применяемого метода, которая определяется возможностью проверки различных качественных характеристик объектов самого разного типоразмера; X_2 – степень унификации средств контроля; X_3 – производительность методов при контроле качества объектов; X_4 – разрешающая способ-

ность; X_5 – надежность метода контроля; X_6 – характер контроля, т.е. способ связи и воздействия на контролируемый объект.

Следующим этапом анализа является составление экспертами систем сравнения по каждому критерию X : $X_1 > X_2$, $X_1 < X_3$, $X_1 < X_4$, $X_1 < X_5$, $X_1 > X_6$, $X_2 < X_3$, $X_2 < X_4$, $X_2 < X_5$, $X_2 < X_6$, $X_3 = X_4$, $X_3 = X_5$, $X_3 < X_6$, $X_4 > X_5$, $X_4 > X_5$, $X_5 > X_6$.

Затем строится матрица предпочтительности (табл. 5.4), в которой знаки $>$, $=$, $<$ заменяются коэффициентами предпочтительности. В рассматриваемом примере в качестве коэффициентов предпочтительности приняты значения 1,5; 1,0; 0,5 соответственно.

Т а б л и ц а 5.4

Матрица предпочтительности

X_i	X_j						Первый шаг		Второй шаг	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	$\sum a_{ij}$	ρ_i^{pn}	ρ_{ij}^{pn}	ρ_i^{omn}
X_1	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	5,5	0,153	29,75	0,146
X_2	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5	0,097	19,75	0,197
X_3	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	6,5	0,180	37,75	0,185
X_4	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	8,0	0,222	46,75	0,229
X_5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5	7,0	0,194	39,25	0,192
X_6	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,0	5,5	0,153	30,25	0,151
Сумма							36,0	1,0	204,0	1,0

В этой таблице предусматривается последовательное определение абсолютных и относительных значений отдельных параметров, а затем – абсолютных и относительных приоритетов параметров. Причем b_i рассчитываются как и суммы a_{ij} значений, представленных в табл. 5.4, т.е. $b_1 = 5,5$; $b_2 = 3,5$; $b_3 = 6,5$; $b_4 = 8,0$; $b_5 = 7,0$; $b_6 = 5,5$. А значения ρ_i^{pn} , ρ_{ij}^{pn} , и ρ_i^{omn} находятся по формулам (5.3) и (5.5). Затем следует этап, в котором эксперты составляют системы сравнения вариантов по каждому критерию X и определяют уровень их значимости. Для этого также применяется метод расстановки приоритетов с той лишь разницей, что объектами сопоставления теперь являются не частные критерии x , а варианты решений Y . Задача решается по приведенной выше схеме: составляется система сравнений и на ее основе

синтезируется квадратная матрица предпочтительности по каждому варианту.

Получив данные о весах всех вариантов по отдельным частным критериям, их можно представить в соответствующих рядах (табл. 5.5).

На последнем этапе анализа по формуле (5.6) определяется качественная оценка Q_{y_i} , позволяющая дать характеристику выбранных методов контроля: $Q_{y_1} = 0,167$; $Q_{y_2} = 0,294$; $Q_{y_3} = 0,251$; $Q_{y_4} = 0,317$.

Т а б л и ц а 5.5

Значения приоритетов по вариантам

Значения приоритетов по критериям	Значения приоритетов по вариантам			
	$\rho_{y_1}^{отн}$	$\rho_{y_2}^{отн}$	$\rho_{y_3}^{отн}$	$\rho_{y_4}^{отн}$
$\rho_1^{отн} (\rho_1^{отн} = 0,146)$	0,222	0,328	0,222	0,429
$\rho_2^{отн} (\rho_2^{отн} = 0,097)$	0,157	0,275	0,208	0,360
$\rho_3^{отн} (\rho_3^{отн} = 0,185)$	0,152	0,283	0,283	0,283
$\rho_4^{отн} (\rho_4^{отн} = 0,229)$	0,152	0,283	0,283	0,283
$\rho_5^{отн} (\rho_5^{отн} = 0,192)$	0,152	0,283	0,283	0,283
$\rho_6^{отн} (\rho_6^{отн} = 0,151)$	0,183	0,317	0,183	0,317

В результате сравнения полученных значений комплексных показателей Q_{y_i} можно сделать вывод о том, что оптимальным (в смысле универсальности, степени унификации, производительности, разрешающей способности, надежности и воздействия на контролируемый объект) является оптический метод контроля.

5.3.4.2. Предварительный выбор элементов структуры ИУС на основе экспресс-ФСА

Покажем особенности применения экспресс-ФСА на примере предварительного выбора одного из элементов цифровой ИУС – фирменного запоминающего устройства.

Цель ФСА заключается в том, чтобы определить, существуют ли зоны отрицательного дисбаланса по функциям, которые выполняются определенными структурными элементами БЗУ. Структурная схема БЗУ дана в гл. 4 и содержит блок управления (БУ), блок памяти (БП), блок предварительной обработки (БПО), схему адресации (СА), блок связи (БС), блок связи с монитором (БСМ), блок связи с ЭВМ (БСЭВМ).

Структурно-элементная модель БЗУ выполнена в виде иерархического графа с дроблением до первого уровня структуризации (рис. 5.17) [4].

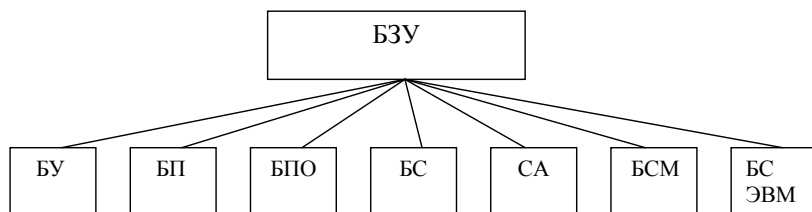


Рис. 5.17. Структурно-элементная модель буферного запоминающего устройства

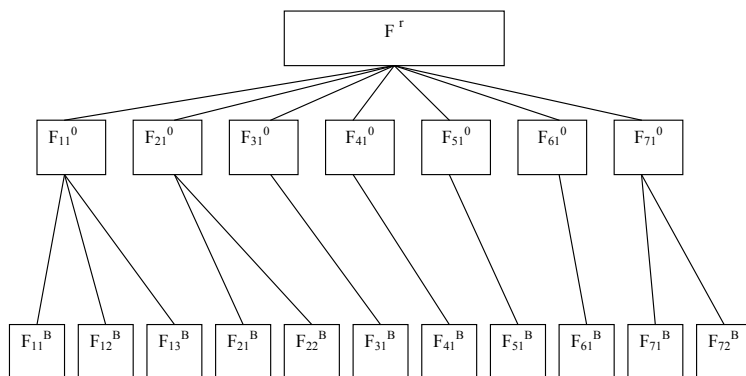


Рис. 5.18. Функциональная модель буферного запоминающего устройства

На следующей операции проведения экспресс-анализа осуществляется формирование функций и построение укрупненной функциональной модели устройства (рис. 5.18). Функциональная модель содержит два уровня.

На первом уровне модели находится главная функция, определяющая назначение данного (F^I) – передача видеoinформации от ДТИ к ЭВМ.

Второй уровень модели представляется основными функциями:

F_{11}^0 – передача информации с ДТИ в БП;

F_{21}^0 – синхронизация работы БП и СА;

F_{31}^0 – обеспечение адресации записываемой информации в БП;

F_{41}^0 – запись (считывание) информации с ДТИ через БПО в БП;

F_{51}^0 – вывод информации из БП на монитор;

F_{61}^0 – управление работой записи и считывания информации в БП;

F_{71}^0 – согласование схемы адресации и ЭВМ.

На третьем уровне укрупненной функциональной модели расположены вспомогательные функции: F_{11}^B – усиление видеосигнала; F_{12}^B – разделение (отделение) видеосигнала от строчного и кадрового синхроимпульсов; F_{13}^B – оцифровывание видеосигнала; F_{21}^B – синхронизация БПО; F_{22}^B – синхронизация БУ; F_{31}^B – синхронизация записи информации в БП; F_{41}^B – считывание информации из ЭВМ через блок связи с ЭВМ в оперативное запоминающее устройство БП; F_{51}^B – контроль вывода информации; F_{61}^B – синхронизация схемы адресации и блока памяти; F_{71}^B – адресации записи информации; F_{72}^B – управление записью и считыванием информации.

С учетом содержания функций, выполняемых элементами разрабатываемого БЗУ, строится совмещенная модель (табл. 5.6).

Т а б л и ц а 5.6

Функции элементов БЗУ

Элементы конструк- ций устройства	Содержание выполняемой функции	Код функции	Вид функции
Блок предваритель- ной обработки (БПО)	Передаёт информацию с ДТИ в БП.	F_{11}^0	Основная
	Усиливает видеосигнал.	F_{11}^B	Вспомогательная
	Отделяет видеосигнал от строчного и кадрового синхроимпульсов.	F_{12}^B	Вспомогательная
	Оцифровывает видеосигнал	F_{13}^B	Вспомогательная
Блок синхронизации (БС)	Обеспечивает синхрони- зацию работы БП и СА.	F_{21}^0	Основная
	Синхронизует БПО.	F_{21}^B	Вспомогательная
	Синхронизует БУ	F_{22}^B	Вспомогательная
Схема адресации (СА)	Обеспечивает адресацию записываемой информа- ции в БП.	F_{31}^0	Вспомогательная
	Синхронизует запись информации в БП	F_{31}^B	Вспомогательная
Блок памяти (БП)	Осуществляет запись и считывание информации с ДТИ через БПО.	F_{41}^0	Основная
	Считывает информацию с ЭВМ	F_{41}^B	Вспомогательная
Блок связи с монито- ром (БСМ)	Обеспечивает вывод ин- формации из БП на монитор	F_{51}^0	Основная
Блок управления (БУ)	Осуществляет управление работой записи и считы- вания информации в БП.	F_{61}^0	Основная
	Обеспечивает синхрони- зацию СА и БП	F_{61}^B	Вспомогательная
Блок связи с ЭВМ (БС ЭВМ)	Осуществляет согласо- вание СА и ЭВМ.	F_{71}^0	Основная
	Осуществляет адресацию записи информации.	F_{71}^B	Вспомогательная
	Управляет записью и счи- тыванием информации	F_{72}^B	Вспомогательная

Для определения весомости каждой функции в обеспечении главной внешней функции БЗУ использованы экспертные оценки. Уровень значимости функций определяется с использованием метода расстановки приоритетов.

Для упрощения выполнения расчетов обозначим через X_i^{\ominus} только соответствующие основные функции, выполняемые элементами разрабатываемого БЗУ: $X_1^{\ominus} - F_{11}^{\circ}$, $X_2^{\ominus} - F_{21}^{\circ}$, $X_3^{\ominus} - F_{31}^{\circ}$, $X_4^{\ominus} - F_{41}^{\circ}$, $X_5^{\ominus} - F_{51}^{\circ}$, $X_6^{\ominus} - F_{61}^{\circ}$, $X_7^{\ominus} - F_{71}^{\circ}$. Результаты экспертной оценки значимости функций ($\rho_i^{\text{отн}}$) представлены в табл. 5.7.

На следующем этапе проводимого экспресс-анализа определяется удельной вес расходов по всем структурным элементам БЗУ. На этом этапе анализа удельный вес затрат может быть также определен на основе метода расстановки приоритетов.

Распределение затрат по функциям БЗУ выполнялось «автономным» способом. Дальнейший анализ на основе экспресс-ФСА проводится с целью выявления зон рассогласования между относительной значимостью функций ($\rho_i^{\text{отн}}$) и затратами на их реализацию ($S_i^{\text{отн}}$). Результаты расчетов представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.7

Оценка уровня значимости основных функций БЗУ

X_i	X_j							Первый шаг		Второй шаг	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	$\sum a_{ij}$	ρ_i	ρ_{ij}	$\rho_i^{\text{отн}}$
X_1	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	5,0	0,102	32,0	0,098
X_2	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0	1,0	7,0	0,143	47,5	0,146
X_3	1,5	0,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	7,0	0,143	45,5	0,139
X_4	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	10,0	0,204	68,5	0,210
X_5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	5,0	0,102	34,0	0,104
X_6	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	7,5	0,153	49,0	0,151
X_7	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	7,5	0,153	49,0	0,151
	Сумма							49,0	1,0	325,5	1,0

Таблица 5.8

**Коэффициенты весомости основных функций БЗУ
и относительные затраты на их реализацию**

Оценка функций	Основные функции						
	F_{11}^0	F_{21}^0	F_{31}^0	F_{41}^0	F_{51}^0	F_{61}^0	F_{71}^0
Уровень значимости функций, $\rho_i^{\text{отн}}$	0,098	0,146	0,139	0,210	0,104	0,151	0,151
Уровень относительных стоимостных затрат на функции, $S_i^{\text{отн}}$	0,20	0,05	0,05	0,50	0,05	0,05	0,10

Наличие дисбаланса по функциям F_{11}^0 и F_{41}^0 значительно уменьшает область поиска и позволяет перейти к решению задач, связанных с определением резерва экономии с учетом локализации зоны излишних затрат и формулировкой требований по устранению технических причин избыточных стоимостных задач.

5.3.4.3. Выбор оптимального варианта структуры элементов ИУС

Покажем особенности выбора оптимального варианта структуры ИС так же, как и в п. 5.3.4.2, на примере БЗУ. То есть объектом проведения ФСА является структура (структурная схема конструкция) БЗУ. Цель анализа – разработка вариантов структуры БЗУ и выбор из них оптимального (например, в смысле простого, менее громоздкого, дешевого и надежного) из всех альтернатив [4, 6].

Основываясь на генеральной цели – создать новую конструкцию БЗУ, строится дерево целей и задач.

Дерево целей представляет собой форму описания требований, предъявляемых к конструкции разрабатываемого БЗУ. На первом уровне дерева целей – «генеральная цель», формируемая исходя из главного функционального назначения и области применения разрабатываемого БЗУ. Второй уровень – «цели», предъявляемые к разрабатываемому БЗУ, и условия, при которых возможно достижение «генеральной цели». Третий уровень – задачи», определяемые путем детализации требований и элементов второго уровня, исходя из возможных вариантов схемных конструктивных решений.

Анализируя назначение БЗУ, можно выделить его следующие основные задачи: F_1 – осуществление передачи информации с телекамеры в блок памяти и обеспечение помехоустойчивости работы системы (функцию выполняет БПО); F_2 – обеспечение синхронизации и надежности работы всех блоков (функцию обеспечивает БС); F_3 – осуществление формирования адреса, по которому записывается или считывается информация (функцию выполняет СА); F_4 – осуществление управлением работой записи и считывания информации в блок памяти (функцию выполняет БУ); F_5 – обеспечение приема информации с телекамеры, запоминание информации и выдача ее на ЭВМ (функцию выполняет БП); F_6 – ввод информации с ЭВМ в устройство и обеспечение надежности работы всего блока (функцию выполняет БС ЭВМ); F_7 – выполнение функций визуального контроля и обеспечение удобства в работе с устройством (функцию выполняет БСМ).

Используя метод расстановки приоритетов, определяется уровень значимости перечисленных выше функций по отношению к генеральной функции БЗУ в целом. Результаты расчетов представлены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Уровни значимости функций БЗУ

Оценка функций	Код основных функций						
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
Уровень значимости функций, $\rho_{\text{отн}}$	0,100	0,126	0,159	0,175	0,210	0,11	0,124

Разрабатываемое БЗУ определяется характерным для него набором основных функций, каждую из которых осуществляет какой-либо один структурный элемент (материальный носитель). Далее по этим функциям выбираются различные варианты их исполнения и записываются в форме матрицы (морфологической таблицы).

Рассмотрим три варианта исполнения функций БЗУ: I – БЗУ, реализованное на стандартных узлах (приборах), осуществляет обработку контурной видеоинформации; II – БЗУ, реализованное на стандартных узлах (приборах), осуществляет обработку полутоновой видеоинформации; III – разрабатываемый вариант БЗУ (табл. 5.10).

Морфологический анализ матрицы структурных решений (табл. 5.10) позволяет выделить возможный состав разрабатываемого объекта.

Таблица 5.10

Формирование вариантов

Код основных функций	Варианты решений		
	I	II	III
F_1	P_{11} – блок выделения контуров	P_{12} – аналого-цифровой преобразователь	P_{13} – разрабатываемый блок предварительной обработки
F_2	P_{21} – стандартный генератор сигналов	P_{22} – набор стандартных генераторов сигналов	P_{23} – разрабатываемый блок синхронизации
F_3	P_{31} – стандартный блок адресации ЭВМ	P_{32} – набор стандартных блоков (дешифратор, генератор, регистры)	P_{33} – разрабатываемый блок адресации
F_4	P_{41} – стандартный блок управления ЭВМ	P_{42} – стандартный блок управления ЭВМ	P_{43} – разрабатываемый блок управления
F_5	P_{51} – стандартный блок ОЗУ ЭВМ	P_{52} – блок памяти – ОЗУ данной ЭВМ (режим прямого доступа к памяти ЭВМ)	P_{53} – разрабатываемый блок памяти
F_6	P_{61} – стандартные интерфейсы	P_{62} _____	P_{63} – разрабатываемый блок связи с ЭВМ
F_7	P_{71} – блок вывода бинарной информации	P_{72} – блок вывода цветной информации	P_{73} – разрабатываемый блок связи с монитором

Формирование вариантов разработки БЗУ осуществлялось на основе комбинирования позиций морфологической карты путем выбора одного из элементов по каждой строке матрицы (см. табл. 5.10). Проанализировав преимущества и недостатки и проверив на совместимость элементов, получаем варианты реализации БЗУ, которые могут быть условно записаны следующим образом:

I	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{53}	P_{63}	P_{73}
II	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{53}	P_{63}	P_{72}
III	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{41}	P_{53}	P_{61}	P_{73}
IV	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{52}	P_{61}	P_{72}
V	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{42}	P_{51}	P_{61}	P_{72}
VI	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{41}	P_{52}	P_{61}	P_{71}

Здесь римскими цифрами указаны варианты реализаций БЗУ, полученные в результате сочетаний функций, указанных в табл. 5.10.

Т а б л и ц а 5.11

Оценка качества исполнения функций по вариантам

Код функций	Уровень значимости функций	Код варианта исполнения функций	Уровень исполнения функций, балл	Оценка исполнения варианта функций
F_1	0,100	P_{11}	1	0,100
		P_{12}	2	0,200
		P_{13}	3	0,300
F_2	0,126	P_{21}	2	0,252
		P_{22}	1	0,126
		P_{23}	3	0,378
F_3	0,159	P_{31}	2	0,318
		P_{32}	1	0,159
		P_{33}	3	0,477
F_4	0,171	P_{41}	1	0,171
		P_{42}	2	0,342
		P_{43}	3	0,513
F_5	0,210	P_{51}	1	0,210
		P_{52}	3	0,630
		P_{53}	3	0,630
F_6	0,110	P_{61}	2	0,220
		P_{63}	3	0,330
F_7	0,124	P_{71}	1	0,124
		P_{72}	3	0,372
		P_{73}	2	0,248

Каждый вариант представляет собой взаимосвязанную совокупность элементов – носителей, функционально ориентированных на выполне-

ние основной цели создания БЗУ. При этом учитывая, что в данном случае все варианты реализации функций совместимы и при существующем уровне техники конструктивно и технологически реализуемы, оставим их для дальнейшего рассмотрения.

Для того чтобы выбрать наиболее целесообразный вариант решения, необходимо по каждому из них определить качественную оценку исполнения функций. Оценка исполнения варианта функции рассчитывается как произведение уровня значимости функции на уровень ее исполнения в баллах. Результаты расчетов представлены в табл. 5.11.

Степень исполнения функций в баллах определялась методом коллективной экспертизы.

Расчет окончательной оценки выбранных к реализации вариантов БЗУ представлен в табл. 5.12. Комплексный показатель качества предлагаемых к разработке вариантов БЗУ представляет собой сумму расчетных значений оценок исполнения функций. Например, для первого варианта такой показатель будет складываться из следующих величин: 0,300; 0,378; 0,477; 0,513; 0,630; 0,330; 0,248.

По результатам обобщенной оценки вариантов (см. табл. 5.12), согласно условиям выбора, дальнейшему анализу должны подлежать три варианта (I, II и IV), соответствующие качественной реализации конструкции БЗУ.

Таблица 5.12

Оценка качества комбинированных вариантов конструкции БЗУ

Номер варианта	Состав варианта							Обобщенная оценка варианта
I	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{53}	P_{63}	P_{73}	2,876
II	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{53}	P_{63}	P_{72}	3,000
III	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{41}	P_{53}	P_{61}	P_{73}	2,424
IV	P_{13}	P_{23}	P_{33}	P_{43}	P_{52}	P_{61}	P_{72}	2,890
V	P_{11}	P_{21}	P_{31}	P_{42}	P_{51}	P_{61}	P_{72}	1,814
VI	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{41}	P_{52}	P_{61}	P_{71}	1,630

Укрупненная схема стоимости блоков, обеспечивающих основные функции, позволила определить затраты на их исполнение по выбранным наиболее предпочтительным вариантам (табл. 5.13).

Таблица 5.13

Оценка затрат на реализацию функций по вариантам

Код функций	Код вариантов исполнения функций			Стоимостная оценка вариантов исполнения функций, руб.		
	вариант первый	вариант второй	вариант четвертый	вариант первый	вариант второй	вариант четвертый
F_1	P_{13}	P_{13}	P_{13}	20,0	10,0	20,0
F_2	P_{23}	P_{23}	P_{23}	300,0	1000,0	300,0
F_3	P_{33}	P_{33}	P_{33}	1000,0	200,0	1000,0
F_4	P_{43}	P_{43}	P_{43}	100,0	100,0	100,0
F_5	P_{53}	P_{53}	P_{52}	350,0	350,0	800,0
F_6	P_{63}	P_{63}	P_{61}	300,0	300,0	30,0
F_7	P_{73}	P_{72}	P_{72}	50,0	250,0	250,0

Анализ затрат на осуществление всех функций (см. табл. 5.13) позволяет выявить среди них те, которые обуславливают основную долю издержек. Это может быть использовано для решения задачи по снижению стоимости разработки БЗУ.

Сумма затрат по всем функциям дает общую стоимостную оценку вариантов S_i :

$$S_1 = 2120,0; S_2 = 2320,0; S_4 = 2500,0.$$

Критерием выбора варианта реализации блока БЗУ является минимум функциональных затрат S_i и удельных затрат на единицу комплексного показателя качества $k_{уд_i}$:

$$k_{уд_1} = 737,13; k_{уд_2} = 773,33; k_{уд_4} = 865,05.$$

Как следует из приведенного расчета, лучшими характеристиками обладает первый (или разрабатываемый третий) вариант БЗУ. Это также подтверждает сравнительный анализ по экономическим и техническим параметрам БЗУ.

Таким образом, детальный ФСА возможных вариантов позволяет выбрать оптимальный вариант исполнения БЗУ.

5.4. Параметрический синтез ИУС на примере систем технического зрения

5.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию СТЗ

Требование к точностным характеристикам СТЗ определяет стоимость C изготовления системы и последующие затраты (потери) Π на ее эксплуатацию. Величина $N = C + \Pi$ может служить характеристикой общих затрат на изготовление и эксплуатацию ОТИЗ. Допустим, что точностные характеристики СТЗ определяются величиной дисперсии σ^2 , с которой вычисляются линейные координаты объекта манипулирования. Тогда $N = N(\sigma^2)$. Поставим задачу отыскания допустимой погрешности оценки координат при минимизации затрат на изготовление и эксплуатацию СТЗ, т.е.

$$\sigma_{\text{доп}}^2 = \underset{\sigma^2}{\text{extr}} N(\sigma^2). \quad (5.9)$$

Для решения уравнения (5.9) применим метод безусловной оптимизации [1, 2], для чего вид целевой функции $N(\sigma^2)$ заменим аналитическим выражением. Определим вид функций $C(\sigma^2)$ и $\Pi(\sigma^2)$, сумма которых задает функцию $N(\sigma^2)$. Предполагаем, что оценки величин $\hat{\Delta x}$, $\hat{\Delta y}$, $\hat{\alpha}_i$ распределены по нормальному закону [7]. Известны методы прогнозирования стоимости при наличии аналога выпускаемой аппаратуры (РЭА) [4, 5], но из-за отсутствия аналогов СТЗ, введенных в производство, представляется целесообразным оценка стоимости $C(\sigma^2)$ на основе следующих двух очевидных предположений о ее свойствах:

$$1) \lim_{\sigma^2 \rightarrow 0} C(\sigma^2) \Rightarrow \infty; \quad \lim_{\sigma^2 \rightarrow \infty} C(\sigma^2) \Rightarrow 0;$$

2) функция $C(\sigma^2)$ монотонно убывает, причем уменьшение σ^2 приво-

дит к сложности и, следовательно, стоимости СТЗ. В качестве функции с отмеченными свойствами выберем следующую функцию:

$$C(\sigma^2) = \frac{K}{\sigma^2}, \quad (5.10)$$

где K – коэффициент, характеризующий возможную плату за единичное повышение точности определения искомых координат. Величины K и (σ^2) зададим следующим образом: $K = C_{\text{пр}}\sigma_1^2$; $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$,

где σ_1^2 – дисперсия определения искомых координат, обусловленная внутренними шумами системы, характеризуемая предельной (максимальной) стоимостью $C_{\text{пр}}$; σ_2^2 – дисперсия определения координат, обусловленная наличием помех на ТИ. Таким образом, в качестве функции $C(\sigma^2)$ будем использовать следующее соотношение:

$$C(\sigma^2) = \frac{C_{\text{пр}}\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (5.11)$$

Вид этой функции будет различным для СТЗ, планируемых к выпуску в серийном производстве, и для СТЗ, запускаемых в конструкторскую проработку и опытное производство. В первом случае стоимость $C(\sigma^2)$, как и любой другой РЭА, определяется расходами, а во втором случае зависит от себестоимости $C(\sigma^2)$ конструкторской разработки, включающей затраты на научные исследования. Определим вид функции потерь $\Pi = \Pi(\sigma^2)$. Если СТЗ способна распознавать ОР и оценивать его положение, то можно предложить использование функции потерь, в которой при правильном распознавании средние потери пропорциональны дисперсии, и параметров:

$$\Pi(\sigma^2) = K_n \sigma^2 = \frac{\Pi_{\text{max}}}{\sigma_{\text{max}}^2} \sigma^2, \quad (5.12)$$

где K_n – угловой коэффициент, равный отношению максимальных потерь Π_{\max} к максимальной дисперсии σ_{\max}^2 , т.е. если СТЗ имеет погрешность σ_{\max}^2 , то затраты на ее эксплуатацию максимальные, что скажется в итоге на производительности потребителя информации (например, транспортного или промышленного робота – ПР) и обслуживаемого им технологического процесса. Для обеспечения качества и эффективного выполнения технологических операций необходимо, чтобы допустимая погрешность $\sigma_{\text{доп}}^2$ СТЗ выбиралась из условия $\sigma_{\text{доп}}^2 < \sigma_{\max}^2$. Максимальные потери Π_{\max} определяются следующим образом:

$$\Pi_{\max} = \sum_{i=1}^{n=4} \Pi_i,$$

где Π_1 – стоимость ремонтно-восстановительных работ при обслуживании ПР; Π_2 – стоимость ремонтно-восстановительных работ для оборудования, обслуживающего ПР; Π_3 – потери, обусловленные простоем ПР и обслуживающего оборудования; Π_4 – затраты, связанные с ремонтно-восстановительными работами по объекту распознавания и рабочей зоне.

Итак, согласно выражениям (5.11) и (5.12) функция $N(\sigma^2)$, характеризующая общие затраты по применению ИС, запишется в следующем виде:

$$N(\sigma^2) = C(\sigma^2) + \Pi(\sigma^2) = \frac{C_{np}\sigma_1^2}{\sigma^2} + \frac{\Pi_{\max}}{\sigma_{\max}^2}\sigma^2,$$

а задача определения искомым точностных характеристик ИС ставится следующим образом:

$$\sigma_{\text{доп}}^2 = \operatorname{arg\,min}_{\sigma^2} N(\sigma^2). \quad (5.13)$$

Предполагая, что функция $N(\sigma^2)$ унимодальная, вычислим производную от $N(\sigma^2)$ по (σ^2) , приравняем ее нулю и разрешим относительно (σ^2) . В результате получим

$$\sigma_{\text{доп}}^2 = \left(\frac{C_{\text{пр}} \sigma_1^2 \sigma_{\text{max}}^2}{\Pi_{\text{max}}} \right)^{1/2}. \quad (5.14)$$

Для иллюстрации рассмотренного способа выбора допустимых точностных характеристик СТЗ, соответствующих минимуму затрат, конкретизируем выражение (5.11) для аналогового, аналого-цифрового и цифрового вариантов СТЗ, которые описываются в гл. 6. Расчеты показывают, что СТЗ обладает погрешностью $(\sigma^2) = 9\%$ от размера анализируемых изображений, имеет стоимость $C_1(\sigma^2) = 1\,300$ долл. При этом предельные затраты оцениваются как $C_{\text{пр}} = 18\,008$ руб. В этом расчете учитывается ожидаемая экономическая эффективность внедрения в промышленность ПР, очувствленного СТЗ. Подставляя эти данные в (5.11), получим

$$C(\sigma^2) = 11,7 \cdot 10^3 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{-1} \text{ долл.} \quad (5.15)$$

При конкретизации функции потерь предположим, что условные значения Π_{max} равны 3 000 и 8 500 долл. для $\sigma_{\text{max}}^2 = 4\%$. Далее, предполагая, что $\sigma_1^2 = 0,65\%$, и подставляя полученные данные в

(5.12) и (5.15), получим функцию затрат $N(\sigma^2)$. Графики этой функции приведены на рис. 5.19: здесь 1 – соответствует $\Pi_{\max} = 3\,000$ долл., а 2 – $\Pi_{\max} = 8\,500$ долл. Координаты экстремумов функции $N(\sigma^2)$ характеризуют допустимые дисперсии $\sigma_{g1}^2, \sigma_{g2}^2$ и соответствующие им минимумы затрат N_1, N_2 . Как следует из рис. 5.19, увеличение затрат на эксплуатацию ИС приводит к более жестким требованиям по точностным характеристикам ИС.

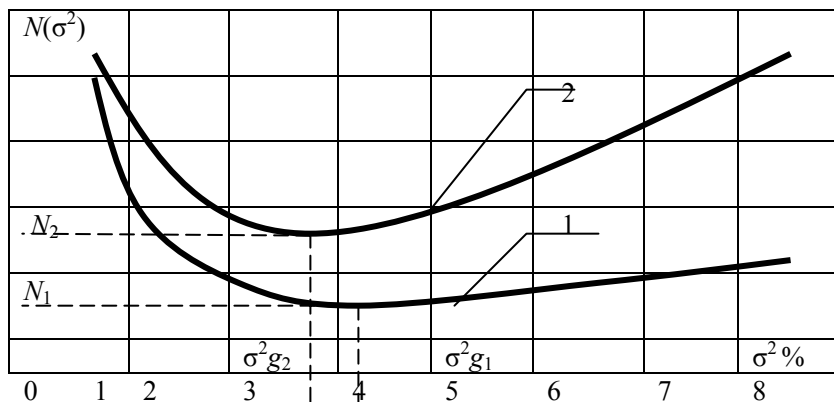


Рис. 5.19. Графики функций общих затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией ИУС

5.4.2. Инженерный (приближенный) расчет СТЗ

5.4.2.1. Расчет емкости памяти ИС

Определение объема видеoinформации, перерабатываемой ИС. Известно [1, 8], что возможное количество комбинаций C_1 формируемых (воспроизводимых) цветных изображений при прочих равных параметрах значительно (в $n_{цв} = m_1^{2M_{II}N_{II}}$ раз) превышает возможное количество C_2 формируемых черно-белых изображений.

Действительно,

$$n_{\text{цв}} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{m_1^{3M_{\text{и}}N_{\text{и}}}}{m_1^{M_{\text{и}}N_{\text{и}}}} = \left(m_1^{M_{\text{и}}N_{\text{и}}}\right)^2, \quad (5.16)$$

где $n_{\text{цв}}$ – отношение величин C_1 и C_2 ; m_1 – число градаций яркости изображений; $M_{\text{и}}$, $N_{\text{и}}$ – соответственно число элементов в строчке и число строк в кадре изображения [1, 9].

Причем количество информации $I_{\text{ц}}$, содержащейся в цветном изображении, в три раза превышает количество информации $I_{\text{чб}}$, содержащейся в изображении черно-белом, т.е. [7]

$$\frac{I_{\text{ц}}}{I_{\text{чб}}} = \frac{\log_2 C_1}{\log_2 C_2} = 3 \log_2 m_1^{M_{\text{и}}N_{\text{и}}}. \quad (5.17)$$

Если известно число N_3 элементов разложения изображения, число N_k анализируемых кадров изображения, число m_1 градаций яркости и число m_2 цветов изображения (или число m_3 цветовых тонов и число m_4 , характеризующее насыщенность цвета), то количество текущей информации (или число двоичных разрядов) I_0 , которое необходимо переработать (запомнить), определяется путем модификации известного выражения [7] в следующем виде:

$$\begin{aligned} I_0 &= N_k N_3 (\log_2 m_1 + \log_2 m_2) = \\ &= N_k M_3 (\log_2 m_1 + \log_2 m_3 + \log_2 m_4). \end{aligned} \quad (5.18)$$

При использовании каких-либо методов сжатия информации (преобразования изображения в точечное или контурное) в выражении (5.18) число N_3 нужно вычислять:

$$N_3 = \frac{S_{\text{и}}}{S_3} = \frac{l'b'}{S_3}, \quad (5.19)$$

где $S_{и}$, $S_{э}$ – площадь, занимаемая изображением, и площадь одного элемента изображения; l , b' – соответственно длина и ширина контура изображения.

Подчеркнем здесь, что формула (5.18) является обобщающей, с помощью которой можно вычислить количество информации I_0 , соответствующее двумерным, трехмерным или цветным изображениям, а также определить I_0 , соответствующее типу ИС (аналоговые, аналого-цифровые и цифровые). Вычисленные значения I_0 по формуле (5.18) приведены в табл. 5.14 (при $N_k = 2$). В таблице первая строка ($m_1 = 2$) I_0 соответствует бинарным выражениям. При пользовании таблицей следует иметь в виду, что при определении количества информации, соответствующей одному кадру изображения, необходимо представлять $I_0/2$, а при оценке количества информации, соответствующей любому количеству кадров, – $\frac{I_0 N_k}{2}$.

Расчет емкости памяти аналоговых ИС. Емкость памяти аналоговых (а также аналого-цифровых и цифровых) ИС определяется простой формулой

$$P_A = ПТИ + ПЭИ + ПАР, \quad (5.20)$$

где ПТИ, ПЭИ, ПАР – емкости памяти, необходимые для хранения (записи) ТИ, ЭИ и алгоритма работы (включая основные программы, подпрограммы, программы цикла и т.п.). Причем для аналоговых ИС алгоритм работы реализуется в аппаратном («жестком») виде.

Число кадров ЭИ, требуемых для запоминания эталонных изображений различной размерности и цветности, находится из

$$N_R^{\text{ЭИ}} = \frac{I_0}{n_{\sigma}} = \frac{S_{\Sigma}^{\text{ЭИ}}}{S_i^{\text{ЭИ}}}, \quad (5.21)$$

где n_{σ} – число бит информации, необходимой для запоминания одного кадра ЭИ; $S_{\Sigma}^{\text{ЭИ}}$ – общая площадь всех кадров ЭИ; $S_i^{\text{ЭИ}}$ – площадь i -го кадра ЭИ.

Таблица 5.14

Количества информации различных изображений

Размерность изображения N_3	Черно-белые изображения				Цветные (монохромные) изображения, $m_2 = 8$				Цветные изображения: цветовой тон, $m_3 = 8$; насыщенность цвета, $m_4 = 8$						
	Количество информации I_0 , Кбит				Количество информации I_0 , Кбит				Количество информации I_0 , Кбит						
	$32 \times$ 32	$64 \times$ 64	$128 \times$ 128	$256 \times$ 512	$1024 \times$ 1024	$32 \times$ 32	$64 \times$ 64	$128 \times$ 128	$256 \times$ 512	$1024 \times$ 1024	$32 \times$ 32	$64 \times$ 64	$128 \times$ 128	$256 \times$ 512	$1024 \times$ 1024
2	2	8	32	128	512	4	16	64	256	1024	4	16	64	256	1024
4	4	16	64	256	1024	8	32	128	512	2048	8	32	128	512	4096
8	6	24	96	384	1536	12	48	192	768	3072	12	48	192	768	3072
16	8	32	128	512	2048	14	56	224	896	3584	14	56	224	896	3584
32	10	40	160	640	2560	16	64	256	1024	4096	16	64	256	1024	4096
64	12	48	192	768	3072	18	72	288	1152	4608	18	72	288	1152	4608
128	14	56	224	896	3584	20	80	320	1280	5120	20	80	320	1280	5120
256	16	64	256	1024	4096	22	88	352	1408	5632	22	88	352	1408	5632
512	18	72	288	1152	4608	24	96	384	1536	6144	24	96	384	1536	6144
1024	20	80	320	1280	5120	26	104	416	1664	6656	26	104	416	1664	6656

Оценка емкости памяти цифровых ИУС. В зависимости от способа ввода информации в память микрокомпьютера, на базе которого реализуется цифровая ИУС, данные системы делятся на два типа: системы со считыванием изображения в буферное ЗУ (программный ввод) и системы со считыванием изображения прямым доступом к памяти микрокомпьютера [1, 10].

Если используется первый режим ввода информации, то емкость памяти $\Pi_{Ц}$ находится при известных емкостях памяти буферного запоминающего устройства $\Pi_{БЗУ}$ и микроЭВМ $\Pi_{ЭВМ}$ следующим образом:

$$\Pi_{Ц} = \Pi_{БЗУ} + \Pi_{ЭВМ}. \quad (5.22)$$

Очевидно, что при использовании второго режима ввода информации величина $\Pi_{Ц}$ определяется в виде $\Pi_{Ц} = \Pi_{ЭВМ}$. При этом емкости памяти микроЭВМ, которую можно отвести для загрузки программного обеспечения зрительной системы для первого и второго режимов считывания изображения, находятся соответственно по следующим формулам:

$$\Pi_1 = \Pi_{Ц} + \Pi_{ОС}, \quad \Pi_2 = \Pi_{Ц} - \Pi_{ОС} - \Pi_{И}, \quad (5.23)$$

где $\Pi_{ОС}$ – емкость памяти, необходимая для записи операционной системы; $\Pi_{И}$ – емкость памяти, требуемая для записи изображения [1, 10].

Первый режим ввода изображения более экономичен и дает возможность отводить большую емкость памяти под программы обработки изображений, т.е. позволяет иметь программное обеспечение для решения более сложных задач.

Емкость памяти ОЗУ ЭВМ для размещения средств программного обеспечения определяется известным выражением (без учета емкости памяти ПОС) [10]

$$\Pi_{ПО} = \sum_{k=1}^k \Pi_{РПК} + \Pi_{СП} + \Pi_{ПТК}, \quad (5.24)$$

где $P_{РПК}$ – емкость памяти, занимаемая k -й рабочей программой; $P_{СП}$ – емкость памяти, занимаемая стандартными программами; $P_{ПТК}$ – емкость памяти, занимаемая программами обеспечения прерываний, тестовыми программами и константами.

Следует отметить, что для исключения возможности эффективного использования памяти БЗУ (не допускающего наличия пустых (лишних) ячеек) следует соблюдать условие

$$M_{БЗУ} \leq M_{ДТИ} ; N_{БЗУ} \leq N_{ДТИ}, \quad (5.25)$$

где $M_{БЗУ}$, $N_{БЗУ}$ – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце буферного ЗУ; $M_{ДТИ}$, $N_{ДТИ}$ – соответственно, число элементов разложения изображения в строке и столбце датчика ТИ.

Причем для считывания квадратного раstra изображения необходимо выполнить следующее условие: $M_{БЗУ} = N_{БЗУ}$.

Если известны число $N_{И}$, $M_{И}$ точек отсчетов (пикселей), число g двоичных разрядов, отводимых на один отсчет, и число кадров изображения, то емкость памяти, необходимая для заполнения цифровым изображением, определяется следующим образом:

$$P_{ЦП} = N_{К} M_{И} N_{И} g, \quad (5.26)$$

где $M_{И} = X_{\max} / \Delta X$, $N_{И} = Y_{\max} / \Delta Y$; X_{\max} , Y_{\max} – максимальные (предельно допустимые) линейные размеры считываемого изображения; ΔX , ΔY – разрешающая способность оценки линейных размеров объектов.

Используя (5.26), легко вычислить емкость памяти БЗУ и ЭД:

$$P_{БЗУ} = N_{К} M_{БЗУ} N_{БЗУ} g; \quad P_{ЭД} = N_{К} M_{ЭД} N_{ЭД} g, \quad (5.27)$$

где $M_{ЭД}$, $N_{ЭД}$ – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце электронного диска.

Емкости памяти видеопроцессора, ППЗУ и внешних накопителей определяются объемом перерабатываемой видеoinформации, их реализацией и вычисляются по известным методикам [10]. При этом следует учитывать, что в случае использования в качестве синхронизатора (например, при записи изображения с ДТИ в БЗУ) необходимо определить адреса ППЗУ (при известных пикселях анализируемой информации) для записи видеосигнала в БЗУ.

В заключение приведем следующую методику расчета емкости памяти ИУС.

1. Определить в зависимости от выбранного типа ИС по формулам (5.18)–(5.19) количество видеoinформации I_0 , перерабатываемой ИС.

2. Вычислить в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений по формулам (5.20) и (5.21) емкость памяти P_a и число кадров $N_{чбп}$, $N_{чбо}$, $N_{цп}$, $N_{зик}$ ИУС аналогового или аналого-цифрового типа.

3. Оценить в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений по формулам (5.22)–(5.23), (5.25)–(5.27) емкость памяти $P_{ц}$ зрительной системы и емкость памяти $P_{бпзу}$, $P_{озу}$, $P_{вп}$, $P_{ппзу}$, $P_{эд}$, $P_{вп}$ элементов ИУС цифрового типа.

4. Рассчитать по формуле (5.24) емкость памяти ОЗУ микрокомпьютера для размещения средств программного обеспечения.

5. Установить адреса ППЗУ буферного ЗУ, осуществляющего запись ТИ.

5.4.2.2. Оценка быстродействия ИУС

Очевидно, что требования к быстродействию ИУС определяются из требований к производительности робота или другого технологического оборудования, использующего эту зрительную систему. В общем случае быстродействие робототехнической системы, включающей ИС, робота и средства формирования рабочей зоны, оценивается простым выражением

$$T_{PC} = T_{CFPC} + T_{IC} + T_p, \quad (5.28)$$

где $T_{\text{СФРС}}$, $T_{\text{ИС}}$, T_p – соответственно время (постоянные времени) формирования рабочей зоны, определения необходимой информации ИУС и выполнения заданной последовательности технологических операций роботом.

Так как робототехническая система функционирует в реальном производственном цикле, то при выборе быстродействия ИС следует выполнять следующие условия:

$$\begin{aligned} T_{\text{ИС}} &\leq T_{\text{PC}} - (T_{\text{СФРС}} + T_p); \\ T_{\text{PC}} &\leq T_{\text{ЦК}}, \end{aligned} \quad (5.29)$$

где $T_{\text{ЦК}}$ – длительность одного цикла производственного конвейера (или длительность одного цикла смены рабочей зоны).

Быстродействие ИУС определяется в общем виде суммированием слагаемых времени, затрачиваемых каждым узлом зрительной системы на выполнение своей функции, т.е.

$$T_{\text{ИУС}} = \sum_{i=1}^{i=m} t_i^{3c}, \quad (5.30)$$

где t_i^{3c} – соответственно время (длительность) реализации своих функций блоков.

Из (5.30) следует очевидный вывод, что быстродействие можно повышать либо путем уменьшения времени обработки информации каждым узлом зрительной системы, либо путем организации параллельных вычислений подсистемами ИУС.

Дальнейший расчет быстродействия целесообразно проводить для разных типов ИУС, анализирующих различные классы изображений.

ИУС, обрабатывающие двумерные, черно-белые изображения. Быстродействие этой ИУС определяется по формуле (5.31) в соответствии с конструктивной и схемной реализацией блоков цельной системы.

Так как быстродействие ИУС обуславливается скоростными характеристиками технологического процесса, расчет быстродействия ИУС целесообразно производить в динамическом режиме [1]. При этом следует учитывать прежде всего то, что скорость выдачи информации ИУС

задается допустимой дискретностью отсчета $\Delta r_{xy}^g, \Delta r_{\alpha}^g$ линейных и угловой координат соответственно, т.е.

$$\Delta r_{xy}^g = \frac{V_k}{t_{\text{ЦК}} + t_{\text{ЦР}}}, \quad \Delta r_{\alpha}^g = \omega_g t_{\text{ЦК}}, \quad (5.31)$$

где V_k – скорость движения объекта на конвейере; $t_{\text{ЦР}}$ – длительность цикла работы ПР; ω_g – угловая скорость поворота объекта в плоскости конвейера; $t_{\text{ЦК}}$ – быстродействие ИУС. Из (5.31) находим

$$t_{\text{ЦК}} = \frac{V_k \Delta r_{xy}^g t_{\text{ЦР}}}{\Delta \kappa_{xy}^g}; \quad t_{\text{ЦК}} = \frac{\Delta r_{\alpha}^g}{\omega_g}, \quad (5.32)$$

где $t_{\text{ЦК}}$ выбирается как меньшее из двух значений. Величина Δr_{xy}^g вычисляется как

$$\Delta r_{xy}^g = \left(\Delta x_{\text{ср}}^2 + \Delta y_{\text{ср}}^2 \right)^{1/2}, \quad (5.33)$$

где $\Delta x_{\text{ср}}, \Delta y_{\text{ср}}$ – смещение объекта по соответствующим осям за время $t_{\text{ЦК}}$.

Ясно, что чем меньше допустимые значения $\Delta x_{\text{ср}}, \Delta y_{\text{ср}}$, тем выше должны быть скоростные свойства ИУС и ПР. С другой стороны, максимальное быстродействие ИУС имеет предельное значение, ограниченное максимально допустимой скоростью перемещения изображения по полю фотокатода фотоприемника телекамеры $V_{\text{ДОП}}^{\text{ДТИ}}$. Превышение этой скорости ведет к появлению эффекта «смазывания» изображения. Такой эффект будет наблюдаться, если

$$C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} < V_{ТИ}^{ДОП} < C_2^n V_K \quad \text{или} \quad V_{ТИ}^{ДОП} < C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} < C_2^n V_K, \quad (5.34)$$

где C_1^n , C_2^n – коэффициенты пропорциональности.

Из (5.34) следует, что при выполнении условия

$$C_1^n V_{ТИ}^{ДОП} \geq V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_2^n V_K$$

или

$$V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_1^n V_{ФТИ}^{ДОП} \geq C_2^n V_K \quad (5.35)$$

эффекта «смазывания» изображения не будет и верхний предел быстродействия будет определяться предельными скоростными характеристиками остальных блоков ИУС.

Быстродействие ИУС аналого-цифрового типа определяется в основном аналогично ИУС аналогового типа по формулам (5.31)–(5.36) с добавлением методики расчета быстродействия ввода и обработки изображения микроЭВМ, изложенной ниже.

Быстродействие ИУС цифрового типа оценивается по формуле

$$T_{ОТИС}^{ПЦЧБ} = \sum_{i=1}^{n=8} t_i^{ПЦЧБ}, \quad (5.36)$$

где $t_1^{ПЦЧБ}$, $t_2^{ПЦЧБ}$, $t_3^{ПЦЧБ}$, $t_4^{ПЦЧБ}$, $t_5^{ПЦЧБ}$, $t_6^{ПЦЧБ}$, $t_7^{ПЦЧБ}$, $t_8^{ПЦЧБ}$ – соответственно время, необходимое для установки требуемого освещения рабочей зоны блоком освещения, установки (включения) светофильтра, формирования ТИ, считывания (записи) ТИ в буферное устройство, обработки ТИ видеопроцессором, извлечения необходимой информации на микрокомпьютере, подстройки параметров зрительной системы блоком адаптации.

Отметим здесь, что время, затрачиваемое на установку требуемо-

го освещения рабочей зоны ($t_1^{\text{ПЦЧБ}}$), а также установки нужного фильтра ($t_2^{\text{ПЦЧБ}}$), может быть только в начальной стадии функционирования ИС (когда работа зрительной системы осуществляется по одному кадру ТИ). В установившемся режиме время $t_1^{\text{ПЦЧБ}}$ обуславливается частотой включения источников света, обеспечивающих требуемую подсветку ОМ, а время $t_1^{\text{ПЦЧБ}}$ можно не учитывать, так как свет через фильтр проходит практически мгновенно.

Время формирования ТИ $t_3^{\text{ПЦЧБ}}$ определяется частотными характеристиками телевизионных камер

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = \tau_{\text{ТК}}, \quad (5.37)$$

где $\tau_{\text{ТК}}$ – период повторения кадров ТК. Выражение (5.37) можно представить в другом виде:

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}}, \quad (5.38)$$

$M^{\text{ТИ}}, N^{\text{ТИ}}$ – соответственно число элементов в строке и число строк ТИ (или соответственно число строк и столбцов ТИ); $\tau_{\text{Э}}$ – время считывания i -го элемента ТИ. При использовании нескольких ТК, последовательно воспринимающих ТИ, время формирования изображения вычисляется следующим образом:

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} \tau_{\text{ТК}i} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} M_i^{\text{ТИ}} N_i^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}i}, \quad (5.39)$$

где $\tau_{\text{ТК}i}$ – период повторения кадров i -й ТК; $N_{\text{ТК}}$ – количество ТК; $\tau_{\text{Э}i}$ – время передачи i -го элемента ТИ i -й ТК.

В случае применения в ТК режима «электронного окна» размером

$M_0^{TK} \times N_0^{TI}$ время $t_3^{ПЦЧБ}$ уменьшается за счет уменьшения объема воспринимаемой информации.

Время считывания ТИ в буферное запоминающее устройство $t_4^{ПЦЧБ}$ определяется временем ввода ($t_{4B}^{ПЦЧБ}$) и предварительной j обработки изображения ($t_{4ОБР}^{ПЦЧБ}$)

$$t_4^{ПЦЧБ} = t_{4B}^{ПЦЧБ} + t_{4ОБР}^{ПЦЧБ} . \quad (5.40)$$

Так как ввод ТИ в БЗУ производится синхронно с формированием ТИ телевизионной камерой, поэтому длительность $t_{4B}^{ПЦЧБ}$ можно вычислить по формулам (5.37)–(5.39). Время обработки видеoinформации находится по формуле

$$t_{4ОБР}^{ПЦЧБ} = M^{TI} N_{TI} \tau_{ЭОБР} = N_K^{TI} t_{КОБР} , \quad (5.41)$$

где $\tau_{ЭОБР}$ – время обработки i -го элемента ТИ; N_K^{TI} – число кадров ТИ; $t_{КОБР}$ – период обработки кадра ТИ.

Длительность считывания ТИ из БЗУ в ЭВМ зависит от реализации БЗУ и в общем случае определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} t_5^{ПЦЧБ} = & N_{БЗУ} N_{БЗУ}^K [t_{СТЛ} M^{TI} N^{TI} + t_{СТР} M^{TI} + \\ & + t_{НСТП} M^{TI} N^{TI} + t_{НСТР} M^{TI} + t_{ПД} M^{TI} N^{TI} + \\ & + t_{БП} (M^{TI} N^{TI} + M^{TI})] , \end{aligned} \quad (5.42)$$

где $N_{БЗУ}$ – количество БЗУ; $N_{БЗУ}^K$ – количество ТИ, записанных БЗУ; $t_{СТР}$ – время пересылки числа, соответствующего первой координате строки; $t_{СТЛ}$ – время пересылки числа, соответствующего первой координате столбца; $t_{ПД}$ – время пересылки N_p – разрядного слова дан-

ных; $t_{\text{НСТЛ}}$ – время наращивания адреса координат столбца; $t_{\text{НСТР}}$ – время наращивания адреса координат строки; $t_{\text{БП}}$ – время безусловного перехода адреса координат.

Быстродействие считывания ТИ из БЗУ в ЭВМ зависит от числа вводимых кадров ТИ, количества БЗУ, размера кадра ТИ и числа разрядов слова данных (при фиксированных длительностях $t_{\text{СТЛ}}$, $t_{\text{СТР}}$, $t_{\text{НСТЛ}}$, $t_{\text{НСТР}}$, $t_{\text{ПД}}$, $t_{\text{БП}}$). Продемонстрируем применение формулы (5.42) для выбора БЗУ различного типа. Например, параметры $N_{\text{БЗУ}} = N_{\text{БЗУ}}^K = 1$, $N_p = 4$ соответствуют реализации БЗУ, осуществляющего считывание полутонного изображения, а параметры $N_{\text{БЗУ}} = N_{\text{БЗУ}}^K = 1$, $N_p = 2$ – реализации БЗУ, обеспечивающего считывание контурного ТИ.

Быстродействие обработки информации на видеопроцессоре зависит от производительности вычислительной структуры и сложности программного обеспечения. В общем виде быстродействие видеопроцессора определяется следующим образом:

$$t_6^{\text{ПЦЧБ}} = t_{\text{ВК}} + t_{\text{ПОИСК}} + t_{\text{СЛ}} = \tau_{\text{БЗУ}} + n_{\text{В}} \frac{K_1}{N_{\text{КВП}} t_{\text{T}}} + \frac{K_2}{N_{\text{КПВ}} f_{\text{T}}}, \quad (5.43)$$

где $t_{\text{ВК}}$ – время ввода кадра ТИ в видеопроцессор; $t_{\text{ПОИСК}}$ – время поиска контура элементов изображения по кадру ТИ; $t_{\text{СЛ}}$ – время слежения за контуром элементов изображения по кадру ТИ; $\tau_{\text{БЗУ}}$ – период повторения кадров БЗУ; $n_{\text{В}}$ – общее число элементов процессорной матрицы видеопроцессора; K_1 – число машинных тактов, затрачиваемых на обработку одного «пустого» элемента изображения, $K_1 = 20, \dots, 100$; K_2 – коэффициент, характеризующий сложность программы работы видеопроцессора (устанавливается для конкретного типа видеопроцессора); f_{T} – тактовая частота видеопроцессора (или его блоков, осуществляющих параллельную обработку ТИ); $N_{\text{КВП}}$ – число параллельных каналов видеопроцессора.

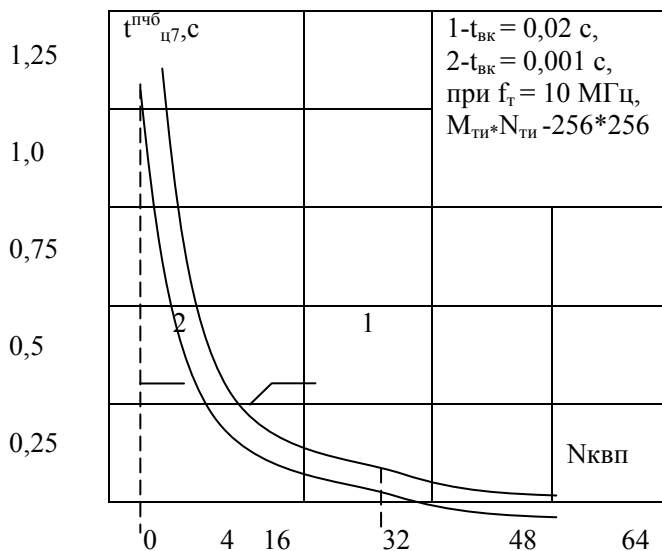


Рис. 5.20. Зависимость времени обработки ТИ от числа каналов видеопроцессора ($f_T = 10$ МГц)

Графики, иллюстрирующие расчетное быстродействие видеопроцессора, приведены на рис. 5.20 и 5.21, схема приведена в гл. 4. Отметим, что графики получены для худшего случая (сложного изображения, требующего больших временных затрат на его обработку). Как следует из анализа графиков для повышения быстродействия видеопроцессора данного типа, необходимо, кроме увеличения его параллельных каналов, повышать тактовую частоту или применять специальные алгоритмы сжатия изображений, позволяющие упростить программное обеспечение этого устройства.

Быстродействие ИУС цифрового типа, использующих один, два или три датчика, следует определять по формулам (5.36)–(5.43). При этом необходимо учитывать количество ТК, БЗУ, ТИ и ЭИ.

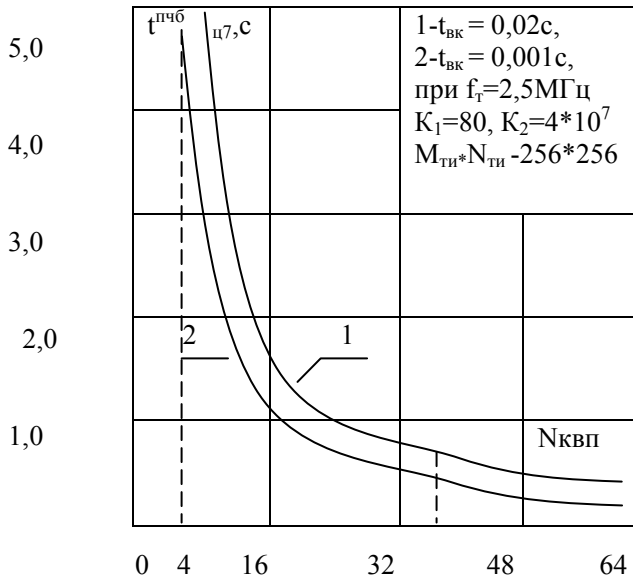


Рис. 5.21. Зависимость времени обработки ТИ от числа каналов видеопроцессора ($f_r = 2,5$ МГц)

ИУС, обрабатывающие двумерные, цветные изображения.

Вначале вычислим быстродействие ИУС с оптическим коррелятором (с аналоговой или аналого-цифровой обработкой сигнала). Возможны два варианта реализации такой ИУС: одноканальные (с одним оптическим коррелятором) и многоканальные (с несколькими оптическими корреляторами).

Для первого и второго вариантов ИС быстродействия $T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ, А1}}, T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ, А2}}$ определяются соответствующими формулами, т.е.

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ, А1}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{бр}}} t_i^{\text{ПЦ, А1}} + N_{\text{ЦВ}} t_{\text{ЦФ}}^{\text{ПЦ, А1}}; \quad (5.44)$$

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{БК}}} t_i^{\text{ПЦ,А2}}, \quad (5.45)$$

где $t_i^{\text{ПЦ,А1}}$ – время выполнения требуемой функции i -м блоком (без операции разделения цвета); $n_{\text{БР}} = N_{\text{ОЭ}} - 1$, $N_{\text{ОЭ}}$ – общее число элементов зрительной системы; $N_{\text{ЦВ}}$ – число сменяемых цветофильтров; $t_{\text{ЦФ}}^{\text{ПЦ,А1}}$ – время смены цветофильтра; $t_i^{\text{ПЦ,А2}}$ – время выполнения требуемых функций i -м блоком одного из каналов зрительной системы; $n_{\text{БК}}$ – наибольшее число блоков одного из каналов зрительной системы.

Как следует из анализа выражений (5.44), (5.45), быстродействие второго (многоканального) варианта ИУС характеризуется более высоким быстродействием за счет выполнения параллельной обработки информации. Для повышения быстродействия первого (одноканального) варианта ИУС следует уменьшить время смены цветофильтров (т.е. увеличить скорость смены цветофильтров) или уменьшить число цветофильтров.

В случае использования ИУС цифрового типа, сравнивающей двумерные цветные изображения, быстродействие $T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,И1}}$ зрительной системы рассчитывается по формулам (5.36)–(5.43).

ИУС, анализирующие трехмерные цветные изображения. Напомним, что здесь возможны реализации зрительной системы на оптическом корреляторе или в цифровом виде. Причем ИУС первого варианта строятся на двух ДТИ и двух оптических корреляторах, а ИУС второго варианта – на одном, двух или трех датчиках ТИ.

В зависимости от исполнения ИУС определим быстродействие зрительной системы. Для первого варианта реализации время получения необходимой информации определяется формулами

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,А1}} = T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А1}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}, \quad (5.46)$$

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,А2}} = T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}, \quad (5.47)$$

где $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}$, $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}$ – соответственно быстродействия блоков принятия решений, вычисляющих пространственные координаты объектов.

Подчеркнем, что формула (5.46) соответствует ИУС одноканальным оптическим корреляторам, а формула (5.47) – многоканальным оптическим корреляторам.

При построении цифровых ИС, сравнивающих трехмерные цветные изображения, быстродействие $T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,Ц}}$ зрительной системы рассчитывается по формулам (5.36)–(5.43). При этом необходимо учитывать время, затрачиваемое на вычисление пространственных координат.

5.4.2.3. Методика расчета ИУС

При выборе конструктивных параметров ИУС может быть использована следующая методика:

1. Выбрать тип ИС в соответствии с техническим заданием, пользуясь методами ФСА и формулами (5.1)–(5.9).

2. Определить допустимые смещения объекта Δx_{max} , $\Delta u_{\text{max},x}$, $\Delta x_{\text{ср}}$, $\Delta u_{\text{ср}}$ в рабочей зоне при заданных его размерах, а также выбрать расстояние между объектом и объективом датчика изображения.

3. Вычислить емкость памяти и установить адреса интерфейсов зрительной системы по формулам (5.16)–(5.27).

5. Определить Φ_r при выбранных типах электронно-лучевых и полупроводниковых приборов, устанавливаемых соответственно в индикаторах ТИ и ДТИ.

6. Вычислить по формулам (5.28)–(5.47) требуемое быстродействие системы.

7. Задать погрешность установки датчика ТИ в соответствии с равенством (5.19).

8. Определить по формуле (5.14) допустимые точные характеристики системы, обеспечивающие минимизацию затрат N , обусловленных изготовлением и эксплуатацией системы.

Модификацией предложенной методики является порядок расчета ИС, учитывающий несовпадающие части ТИ δ_H , возникающие из-за взаимной ориентации объекта, датчика ТИ или вследствие неравномерной освещенности плоскости конвейера с объектом. В этом случае сначала определяется величина δ_H , а затем выполняются п. 1–7.

5.5. Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для моделирования, проектирования и настройки систем технического зрения

5.5.1. Состав аппаратно-программного комплекса

При создании ИС возникает необходимость автоматизации исследования и проектирования систем. Для этой цели разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий решать следующие задачи [1]:

- 1) выбрать и оценить методы фильтрации, предварительной обработки и сегментации изображений, а также формирование и анализ корреляционных функций;
- 2) оценить искажения ТИ и качество их компенсации;
- 3) выбрать и исследовать структуру ИС;
- 4) рассчитать основные параметры ИС;
- 5) определить погрешности ИС;
- 6) визуализировать обрабатываемую видеоинформацию;
- 7) произвести сервисное обслуживание и документально оформить результаты расчета и моделирования.

В состав АПК входят семь микроЭВМ, образующих локальную сеть со звездообразной топологией ЭВМ (одна центральная ЭВМ (ПЭВМ) и шесть периферийных ЭВМ (ПЭВМ1, ..., ПЭВМ6)) [10]. При организации сети используется локальная сеть передачи данных СМNET, работающая под управлением операционной системы РТ-11 (РАФОС) 5-й версии и реализующая доступ к удаленным дискам периферийных ЭВМ. В состав АПК входят следующие изделия (рис. 5.22): УВСИУС – устройство ввода среднеформатных изображений с участка сцены; УВСИОМ – устройство ввода среднеформатных изображений с оптического микроскопа; УВСКИ – устройство ввода среднеформатных кон-

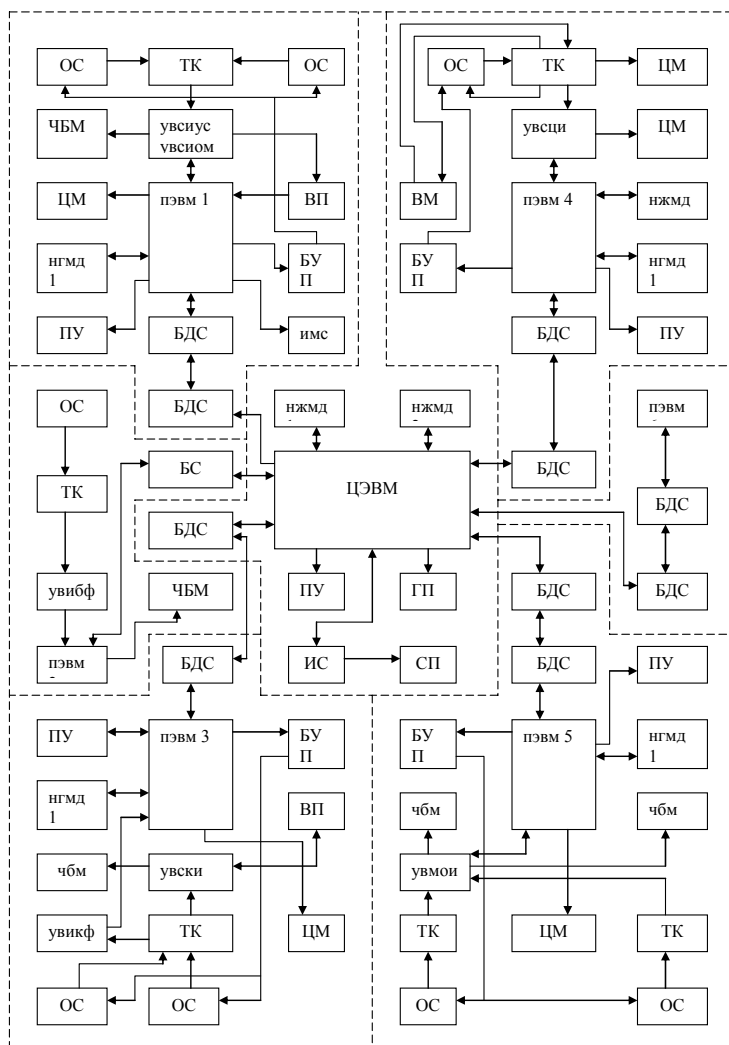


Рис. 5.22. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Таблица 5.15

Характеристики устройств ввода изображений в микроЭВМ

№ п/п	Название устройства	Тип телевизионной камеры	Число элементов разложения изображения	Число подключаемых телекамер	Число градаций яркости	Тип анализируемого изображения
1	УВСИУС	КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия	256×256	1	64	Черно-белое (двухмерное)
2	УВСИОМ	КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия	256×256	1	256	Черно-белое (двухмерное)
3	УВСКИ	КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия	256×256	1	2	Черно-белое (двухмерное)
4	УВИКФ	КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия	256×256	1	256	Черно-белое (двухмерное)
5	УВМОИ	2 камеры ФДМ-1, (фотодиодная матрица), Россия	32×32	2	16	Черно-белое (двухмерное)
6	УВСЦИ	Хитачи, Япония	256×256 4 кадра	4	256	Цветное (двухмерное) монохромное (двухмерное)
			512×512 1 кадр	1		
7	УВИБФ	Хитачи, Япония	1024×1024	1	256	Черно-белое (двухмерное)

турных изображений; УВИКФ – устройство ввода изображений корреляционных функций; УВСЦИ – устройство ввода среднеформатных цветных изображений; УВМОИ – устройство ввода малоформатных объемных изображений; УВИБФ – устройство ввода изображений большого формата; ОС – оптическая система; ТК – телевизионная камера; ВМ – видеоманитофон; ЧБМ – черно-белый монитор; ЦМ – цветной монитор; ПЭВМ – персональная ЭВМ; ЦЭВМ – центральная ЭВМ; НГМД – накопитель на гибких магнитных дисках; НЖМД – накопитель на жестких магнитных дисках; ПУ – печатающее устройство (принтер); ВП – видеопроцессор; БУП – блок управления подсветкой; ИМСС – исполнительный механизм смещения сцены; БДС – блок дальней связи; ИС – интерфейс связи; БС – блок связи; СП – самописец. Характеристики устройств ввода изображений в микроЭВМ приведены в табл. 5.15. Отметим, что УВИКФ обеспечивает ввод изображения ВКФ, формируемых оптическим коррелятором.

Таким образом, АПК содержит шесть рабочих мест: пять следовательских (1РМ, ..., 5РМ) и одно для настройки ИС (6РМ). При подключении ПЭВМ к центральной ЭВМ используются соответствующие БДС, выпускаемые отечественной промышленностью. Связь ПЭВМ IBM э386 АТ/ХТ с ЦЭВМ осуществляется через стандартные входы БС. При настройке подсистемы ИС используются черно-белый цветной монитору, а также программаторы ППЗУ и имитаторы команд микроЭВМ [10].

Таким образом, АПК осуществляет не только ввод изображений различных типов (изображений различных размерностей и цветностей, изображений корреляционных функций), но и управляет подсветкой и смещением рабочей зоны. Кроме того, использование видеоманитофона обеспечивает запись и воспроизведение динамических изображений, необходимых для тестирования и моделирования быстротменяющихся технологических процессов.

Одним из основных параметров АПК является производительность P , которая определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{I_{OC}}{t_{апк}}, \quad (5.48)$$

где I_{OC} – количество (суммарное) информации, перерабатываемое АПК (определяется по формуле (5.18); $t_{апк}$ – время, которое оценивается P .

5.5.2. Алгоритмы программного обеспечения для информационных систем в робототехнике и мехатронике

АПК обладает развитым программным обеспечением (ПО) по обработке и анализу изображений, моделированию, проектированию и расчету ИУС, исследованию эффективности алгоритмов и структур ИУС. Структура ПО дана на рис. 5.23. ПО состоит из восьми пакетов (модулей) программ, каждая из которых реализует один из методов обработки или исследования изображений, а также какую-либо сервисную функцию (обработка изображений, исследование и коррекция изображений, редактирование изображений, сравнение изображений, проектирование ИУС, управление объединенных головных устройств, настройка ИУС, обмен информацией) [1]. Различные алгоритмы для каждого метода выполнены в виде подпрограмм, программой (например, формирование изображений). Подпрограммы, обозначенные цифрами, имеют следующие наименования: 1 – наведение датчика ТИ; 2 – фокусировка датчика ТИ; 3 – установка объектов и светофильтров датчика ТИ; 4 – калибровка ИС и ее «привязка» к требуемой системе координат; 5 – ввод (запись) ТИ; 6 – нелинейная фильтрация ТИ (нелинейное масштабирование); 7 – коррекция геометрических и оптических искажений; 8 – инверсия ТИ; 9 – бинаризация ТИ; 10–14 – соответственно пороговая, анизотропная, рекуррентная, строчная, медианная фильтрации ТИ; 15–17 – выделение контуров методами сдвига кадра по четырем или восьми точкам соответственно; 18 – формирование точечного ТИ; 19 – вычисление координат центра тяжести ТИ; 20 – выделение постоянно наблюдаемых частей ТИ; 21 – перевычисление в другие системы координат; 22 – формирование развертки контура; 23 – вычисление геометрических характеристик ТИ; 24 – селекция информативных частей ТИ; 25 – формирование спектральных характеристик ТИ; 26–35 – соответственно формирование искажений ТИ за счет смещения и поворота объекта относительно ДТИ, крена ДТИ, тангажа ДТИ, поворота ДТИ, изменение расстояния до объекта (изменение масштаба ТИ), скорости

движения объекта, неравномерности освещенности объекта, наличия цветовых засветок в рабочей зоне, погрешностей установки ДТИ, геометрических искажений ТИ; 36 – коррекция искажений ТИ, возникающих из-за неравномерной освещенности сцены и взаимной ориентации объекта и ТИ; 37 – коррекция искажений ТИ, обусловленных скоростью движения объекта (или ДТИ5); 38 – коррекция масштабных искажений ТИ; 39 – коррекция цветовых искажений ТИ; 40 – моделирование черно-белых изображений; 41 – моделирование цветных изображений; 42 – редактирование черно-белых изображений; 43 – редактирование цветных изображений; 44–48 – соответственно классический, модифицированный, комбинированный, разностный и фазовый корреляционные алгоритмы; 49 – анализ амплитуды ВКФ; 50 – анализ крутизны фронтов сечения ВКФ; 51 – поисковый метод оценки координат; 52 – дифференциальный метод оценки координат; 53 – оценка цвета объекта; 54 – адаптивный алгоритм оценки цвета объекта; 55 – определение формы объекта; 56 – оценка положения объекта на плоскости; 57 – определение пространственного положения объекта; 58 – структурный синтез ИУС на основе функционально-стоимостного анализа; 59 – параметрический синтез ИУС; 60 – оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на создание и эксплуатацию ИС; 61–64 – соответственно расчеты светотехнические, оптические, быстродействия, объема памяти; 65 – расчет корреляторов; 66 – методика расчета ИС; 67 – моделирование подсистем ИС; 68 – моделирование структуры ИУС; 69–71 – соответственно управление механизмами смещения (сканирования), подъема-опускания, фиксации (метки); 72–74 – соответственно управление нижней, верхней подсветками и адаптация подсветки; 75–79 – соответственно управление видеопроцессором, буферным запоминающим устройством, электронным диском, ППЗУ; 80 – оценка статистических характеристик погрешности ИУС; 81 – проверка ИС; 82 – тестовые; 83 – имитирующие (команды ЭВМ); 84 – программирование ППЗУ; 85 – проверка программатора; 86, 87 – соответственно запись изображения на ГМД, НМД (и считывание обратно в АПК); 88–90 – соответственно вывод изображения (или другой информации) на АЦПУ, графопостроитель и двух-

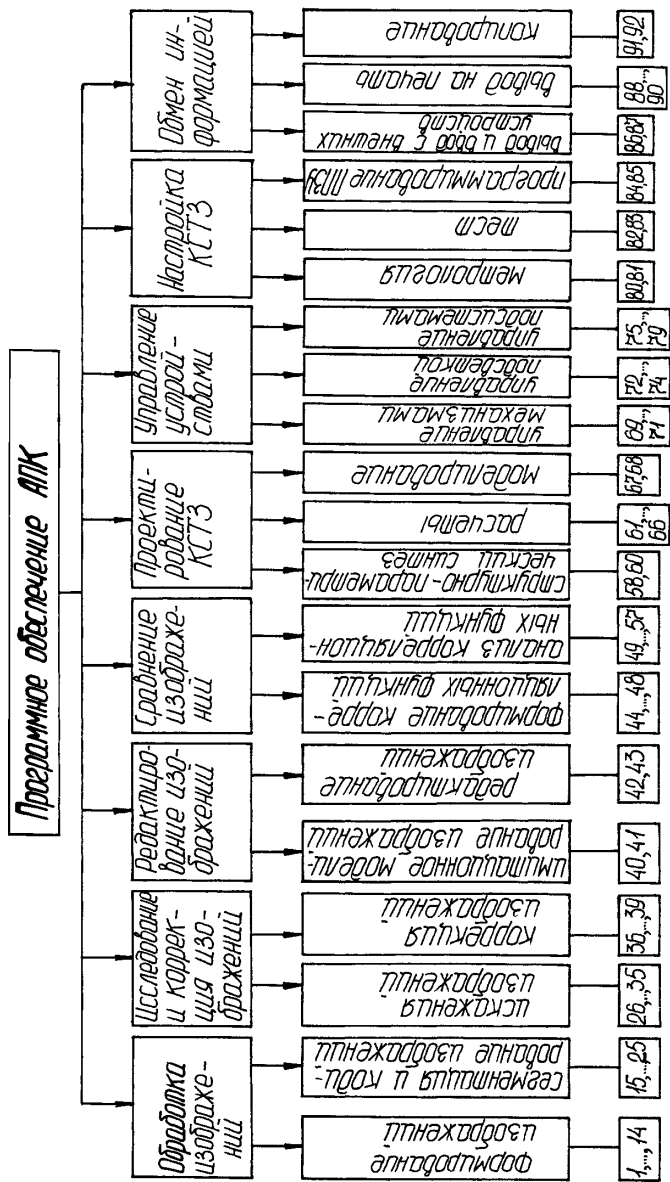


Рис. 5.23. Структура программного обеспечения аппаратно-программного комплекса обработки и анализа изображений

координатный потенциометр; 91, 92 – соответственно, копирование программ с ГМД, НМД.

Такая организация ПО способствует максимальной «открытости» пакета, предоставляя возможность расширять и модифицировать его в процессе эксплуатации.

Структура ПО определяется требованиями, предъявляемыми к ИУС, и позволяет синтезировать архитектуру и произвести расчет параметров ИУС, последовательно выполнить все этапы обработки видеоинформации, выбирая для каждого из них оптимальный (по быстродействию, точности работы или другим требованиям) алгоритм обработки ТИ.

Процесс моделирования ИУС включает в себя этап имитационного моделирования изображений и этап имитационного моделирования зрительных систем применительно к технологической задаче (рис. 5.24).

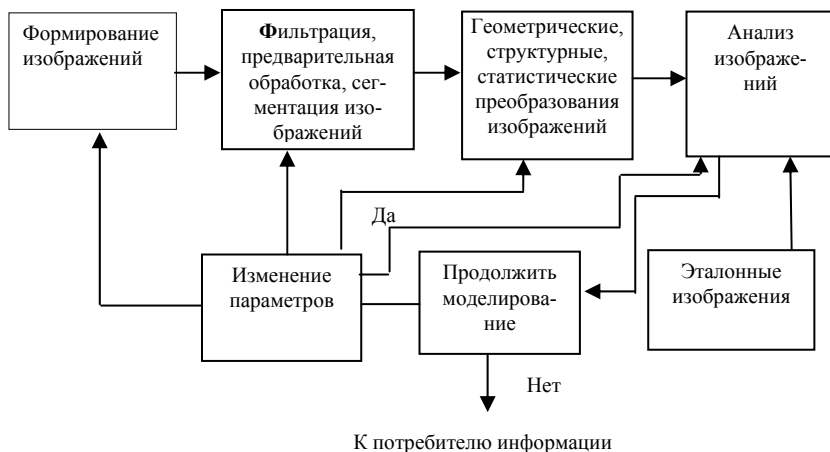


Рис. 5.24. Схема имитационного моделирования изображений аппаратно-программным комплексом

Этап имитационного моделирования изображений рассматривается с позиции моделирования цветных изображений, включающих в себя и черно-белые (монохромные) изображения [1].

В АПК реализуются два способа получения (формирования) изображения: с использованием реальных датчиков оптической информации (телевизионных камер) и с помощью математических моделей. Отметим здесь, что если первый способ позволяет проверить модель с реальными объектами контроля, то второй способ более быстр и экономичен.

После синтеза ИС моделируется ее работоспособность в робототехническом комплексе (например, робот для проверки топологий печатных плат) [1, 9]. Разработанный АПК отличается от известных тем, что позволяет обрабатывать изображения различных размерностей и цветностей, анализировать корреляционные функции и проектировать ИС различного назначения.

5.5.3. Программное обеспечение для информационных устройств и систем робототехники и мехатроники

Вычислительная техника позволила автоматизировать многие виды человеческой деятельности: проектирование, планирование и т.п.

В промышленной робототехнике особое значение придается разработке систем технического зрения роботов. Это обусловлено тем, что промышленные роботы действуют в той же производственной среде, что и человек, а значимость визуальной информации для человека общеизвестна. Для обработки информации с датчиков состояния внешней среды, в том числе с видеодатчиков, естественно использование алгоритмов адаптивного оценивания и управления.

Перспективной областью для внедрения датчиков визуальной внешней информации является медицина. Наличие у медицинского адаптивного робота-манипулятора СТЗ является его основным достоинством. Это придает не только новый уровень исследования патологии, но и возможность дистанционного управления роботоманипулятором.

Машинное зрение – очень привлекательная для современных исследователей и разработчиков проблема, так как аппаратные возможности, предоставляемые в данной области последними достижениями электроники и вычислительной техники, достигли такого уровня, что они уже во многом приближаются к «техническим характеристикам человека». Разрешение многих сенсоров для получения видеoinформации практически полностью соответствует числу

элементов сетчатки глаза человека, а возможности ЭВМ и специализированных приборов близки к характеристиками «вычислительных мощностей» мозга человека.

Сложность понимания изображений машиной заключается в том, что на данный момент практически невозможно создать компьютерную программу, понимающую любую видимую «сцену». Это связано, в первую очередь, с тем, что необходимо анализировать основной предмет, представляющий собой двумерное изображение.

У информационного семантического изображения отсутствует какая-либо «причинная» или динамическая модель формирования, так как это информационное семантическое содержание возникает не под действием каких-либо физических законов, описываемых математическими уравнениями. Информационное наполнение изображения проявляется в виде бесконечного разнообразия яркостно-геометрических структур, модели порождения которых могут просто отсутствовать. Особенно сложной задачей является «понимание» объектов, присутствующих в сцене наблюдения.

Для решения многих практически важных задач машинного зрения общая проблема «понимания изображений» может быть редуцирована к гораздо более простой и ясной проблеме обнаружения и распознавания или измерения по одному или нескольким изображениям объектов, удовлетворяющих некоторому заранее известному модельному описанию. Теория машинного зрения предлагает целый ряд различных модельных описаний наблюдаемых объектов, которые могут быть использованы для их обнаружения и измерения. На настоящий момент предлагается широкий спектр таких моделей – от простейших признаковых описаний до высокоспециализированных и изощренных структурных моделей. Однако общий метод составления работоспособных моделей отсутствует. Разработка и использование моделей, пригодных для решения задачи обнаружения соответствующих объектов, в значительной степени остается на грани науки и искусства, т.е. требует особого «know-how» или, другими словами, знания предметной области, отражающего многолетний опыт исследований по решению частных задач.

Решение задачи автоматического выделения сложных объектов открывает перед системами «машинного зрения» огромное число потенциальных областей применения, таких как промышленная инспекция и контроль качества, робототехника, навигация и транспор-

тировка, медицина и биомеханика, инженерный труд, автоматизация проектирования и множество других. При этом сама задача обнаружения объектов является, безусловно, базовой, но частично технологической задачей по отношению ко всему комплексу основных целевых задач, которые в общих чертах могут быть сформулированы следующим образом [1–5]:

1. Обнаружение объектов и измерений в сцене наблюдения.
2. Высокоточные измерения элементов сцены.
3. Слежение за объектами.
4. Самоориентация и самопозиционирование.
5. Реконструкция поверхностей и обнаружение трехмерных структур.
6. Описание сцены и идентификация объектов.
7. Организация зрительной обратной связи при работе управляемых устройств, манипуляторов или мобильных роботов в изменчивой среде.

Программное обеспечение является неотъемлемой частью любой информационной системы. Основными средствами реализации связи между пользователем и системами мехатроники являются: распознавание отдельных слоев, обучение с последующим воспроизведением рабочей программы, а также языки программирования высокого уровня.

Современные системы распознавания речи весьма примитивны и обычно зависят от говорящего. Они могут распознавать ряд отдельных слов из ограниченного словаря и требуют, чтобы слова разделялись друг от друга значительной паузой. Хотя сейчас уже можно распознавать отдельные слова в режиме реального времени благодаря быстродействующим вычислительным средствам и эффективным алгоритмам обработки, однако способность распознавания отдельных слов для описания задачи сильно ограничена. Более того, распознавание речи требует большого объема оперативной памяти или вторичной памяти (на внешних запоминающих устройствах) для хранения речевых данных, что в свою очередь требует дополнительного времени для обучения построению эталонов речи, необходимых при распознавании.

Обучение с целью последующего воспроизведения рабочей программы, известное также как «программирование обучением», является наиболее распространенным методом управления современны-

ми промышленными роботами. По этому методу робот «обучается» тем движениям, которые затем выполняет в автоматическом режиме. Программирование обучением выполняется за несколько шагов:

1. Ведение робота в медленном режиме при ручном управлении для выполнения технологической операции и запись углов между звеньями робота в соответствующих положениях с целью повторно воспроизведения движения.

2. Корректировка и воспроизведение обучающего движения.

3. Если обучающее движение правильное, то робот запускается в работу на соответствующей скорости для выполнения повторяющихся операций.

Важной задачей в робототехнике, а также в других смежных областях является реализация так называемого «технического зрения», под которым понимают процесс восприятия системой окружающих объектов с помощью датчиков оптической информации, оценки местоположения объектов и их распознавания на основе полученной видеоинформации. Системы технического зрения состоят из датчиков оптической информации (ДОИ) и средств обработки и анализа изображения, а также других устройств. Средства обработки и анализа изображения реализуются на микроЭВМ и микропроцессорах.

Для разработки программного обеспечения таких средств больше всего подходят языки программирования высшего уровня.

Ввод изображения в систему осуществляется с помощью аппаратной части системы (датчиков), после чего происходит формирование и автоматическая настройка изображения. Затем с помощью программного обеспечения начинается анализ полученного изображения:

1. Предварительная обработка. Её основная цель – удаление шумов (сглаживание, фильтрация), улучшение контрастности (преобразование шкалы яркости, обострение), а также коррекция изображений.

2. Сегментация изображений. Это процесс разбиения изображения сцены на составные части, их фрагменты или характерные особенности. Наиболее распространенные методы сегментации базируются на выявлении одного из двух основных свойств изображения – различия и сходства.

3. Описание изображения. Преобразование изображения в совокупность его количественных (числовых) и (или) качественных (логических, вербальных) характеристик. В первую очередь это полу-

чение набора признаков для распознавания (классификации) объектов на изображении, определение их размеров и параметров, задающих положение и ориентацию объектов.

4. Анализ изображения. На этом этапе осуществляется распознавание (а чаще – классификация) объектов на основе выявленных на предыдущих этапах признаков и дается интерпретация наблюдаемой сцены. В более сложных случаях строятся (уточняются) модели проблемной среды.

Теперь рассмотрим общий принцип построения программного обеспечения для систем мехатроники.

Программное обеспечение представляет собой пакет программ, каждая из которых реализует один из методов обработки или исследования изображений, или сервисную функцию. Различные алгоритмы для каждого метода выполнены в виде подпрограмм, объединенных головной программой (например, программа локальной фильтрации изображения). Такая организация ПО способствует максимальной «открытости» пакета, позволяя расширять и модифицировать его в процессе эксплуатации.

Структура ПО определяется задачами исследовательского комплекса и позволяет сформировать соответствующую архитектуру СТЗ и последовательно выполнить все этапы обработки видеoinформации, выбирая для каждого из них оптимальный алгоритм обработки исследуемого изображения. Исходя из специфики решаемых задач, а также основываясь на классическом представлении об этих задачах, ПО можно разделить на следующие модули, или блоки [1, 9–20]:

1. Блок «Техника». Содержит программы связи с внешним оборудованием (устройством позиционирования, стойкой управления роботом), программы обмена между вычислительными машинами и программы управления УВОИ, позволяющие не только эффективно использовать имеющиеся технические средства, но и имитировать с их помощью другие возможные архитектуры систем технического зрения. Кроме того, блок включает в себя программы интерпретации входных данных (например, информация САПР о параметрах контролируемых изделий) и формирования выходных данных (например, программы перемещения координатного стола).

2. Блок «Предварительная обработка». Включает программы компенсации помех (коррекция шкалы яркости, устранение неравномерности освещения и др.), а также программы частотной и ло-

кальной фильтраций, которые обрабатывают исходное изображение объекта, представленное в цифровом виде и хранящееся в одном из ЗУ УВОИ. Результат работы блока – изображение с улучшенными характеристиками.

3. Блок «Сегментация». Содержит программы выделения границ и пороговой обработки. Входная информация – изображение, результат работы – описание составляющих его сегментов, представляющих однородные области.

4. Блок «Анализ». Включает в себя программы выделения и распознавания элементарных структур в формальном описании сегментов изображения.

5. Блок «Синтез». Содержит прикладные программы, осуществляющие описание объекта на основе составляющих его элементов, сравнение описания с моделью и принятие решения. Программы этого блока представляют собой в каждом конкретном случае новую разработку или модификацию. Кроме основных блоков, реализующих этапы обработки видеоинформации, ПО АСОИ содержит также ряд вспомогательных.

6. Блок «Обмен». Включает в себя программы обмена между ЗУ УВОИ и внешними устройствами ЭВМ. В частности, программы блока позволяют хранить и модифицировать базу данных изображений на магнитных дисках и лентах, выводить на печатающее устройство бинарный и полутоновый рисунок, хранящийся в одном из ЗУ.

7. Блок «Исследование». Содержит программы сбора информации об исследуемом изображении в его исходной форме и на различных этапах обработки. Блок программ также включает в себя программы оценки эффективности используемых алгоритмов и технических средств (определение требуемых вычислительных ресурсов, времени работы и т.д.). Использование цветных устройств отображения информации в качестве графических дисплеев позволяет применять средства визуализации (вывод графиков, гистограмм и т.д.), что существенно облегчает работу оператора по выбору информативных признаков, назначению пороговых величин, анализу эффективности алгоритмов обработки.

8. Блок «Редактирование». Включает в себя программы имитационного моделирования и редактирования изображений. При помощи программ этого блока на исходном изображении можно осла-

бить или, наоборот, усилить влияние какого-либо фактора, что бывает необходимо на стадии выбора алгоритмов обработки. Программа имитационного моделирования позволяет синтезировать модель изображения по заданным параметрам, постепенно приближая ее к заданному изображению. Возможные варианты организации использования программного обеспечения АСОИ СТЗ из перечисленных блоков представлены на рис 5.25, 5.26.

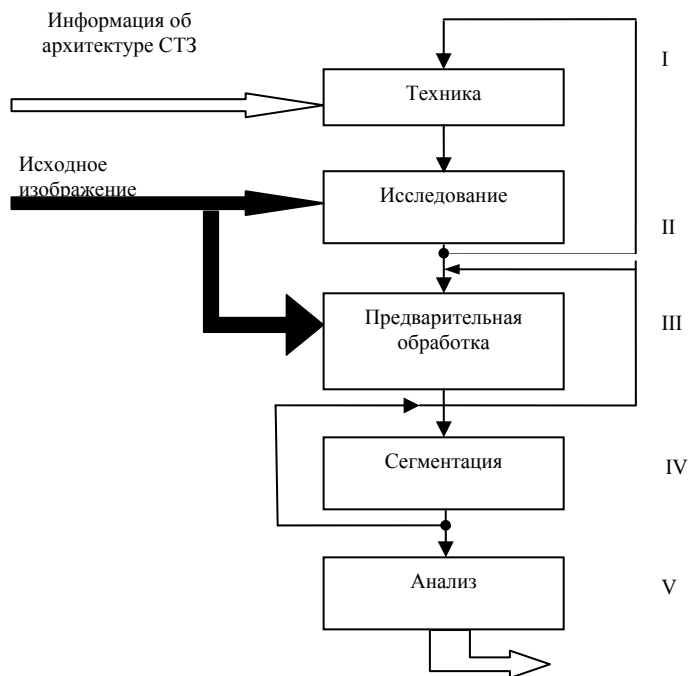


Рис. 5.25. Работа АСОИ с изображением объекта контроля (вариант «а»):
I – моделирование архитектуры СТЗ, II – интерактивный выбор алгоритмов и информативных признаков, III – улучшение изображения, IV – сегментация изображения на основе информативных признаков, V – выделение и распознавание элементарных структур

Вариант «а». После моделирования соответствующей архитектуры прикладной системы технического зрения производится по-

следовательное выполнение этапов обработки и анализа изображений объекта контроля. Исследуется эффективность как отдельных алгоритмов, так и всей системы в целом. В результате такой организации взаимодействия блоков ПО пользователь получает информацию для синтеза прикладных программ контроля конкретного объекта. Блоки I–IV представляют широкий спектр программ, реализующих различные методы обработки видеoinформации. Соответствующие им подпрограммы, хранящиеся в библиотеках, позволяют для каждого объекта скомпоновать оптимальную программу из стандартных модулей. В ряде задач использование блоков оказывается излишним и некоторые из них опускаются. Это зависит от сложности решаемой задачи, вида и качества изображения и др.

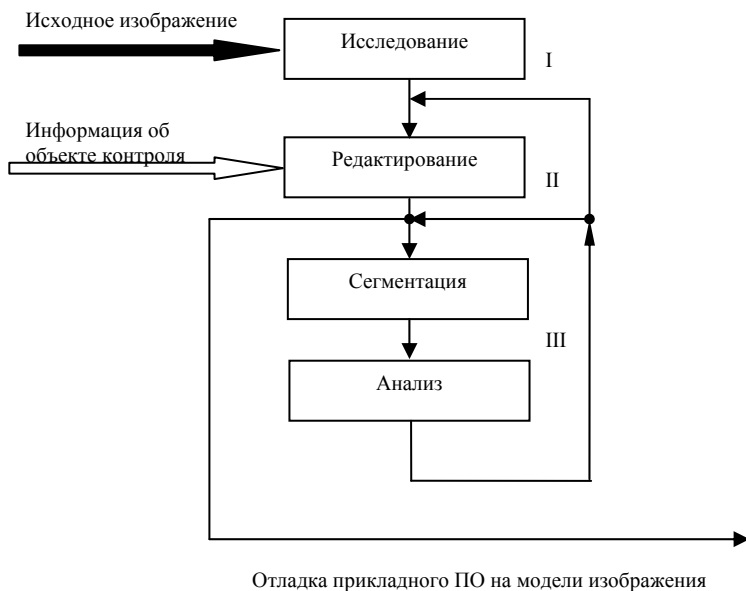


Рис. 5.26. Работа АСОИ с моделью объекта (вариант «б»):

I – выделение параметров имитации, II – создание имитационной модели изображения по выбранным параметрам, III – проверка работоспособности алгоритмов и информативности признаков

Вариант «б». Использование ПО позволяет создать имитационную модель, заменяющую изображение реального объекта при выборке алгоритмов обработки. Это дает возможность оценить информативность различных особенностей изображения при отсутствии их корреляции и выбрать наиболее простые методы обработки. Кроме того, априорные знания об объекте контроля позволяют создавать и исследовать его модели уже на той стадии проектирования конкретной СТЗ, когда реальное изображение объекта еще не может быть получено.

Созданная АСОИ СТЗ является первым шагом решения задачи создания САПР СТЗ промышленного назначения. Описанные выше средства АСОИ использовались при решении задач контроля качества фотошаблонов печатных плат, дефектов внешнего вида керамических конденсаторов и микросхем, правильности маркировки дискретных элементов РЭА, качества исходных материалов и полуфабрикатов в производстве РЭА (керамические и металлизированные пленки и т.п.). Таким образом, можно рассматривать АСОИ СТЗ как первый этап работ по созданию САПР систем технического зрения.

В заключение укажем два варианта применения АСОИ: автоматизированная библиографическая информационно-поисковая система «Изображение» (АБИПСИ), предназначенная для оказания методической помощи центрам цифровой обработки изображений в целях ускорения решения конкретных задач анализа визуальной информации, и АСОИ, формируемая электронным растровым микроскопом (используемым в САПР БИС).

АБИПСИ обеспечивает оперативный сбор, накопление и первичную обработку основных публикаций зарубежных и отечественных авторов, соответствующих области ЦОИ за последние 15–20 лет; оперативное ознакомление с состоянием той или иной проблематики в области математического, алгоритмического, программного, информационного и технического обеспечения центров АСОИ (по существу, получение обзорного библиографического материала); возможность быстрого поиска источников, соответствующих полученному запросу (например, по авторам, ключевым словам, наличию в фондах и т.п.).

Программное обеспечение АБИПСИ базируется на операционных системах РАФОС и ОС РВ для СМ ЭВМ и включает средства

управления текстовыми данными. Система открытая, обеспечивает накопление данных об источниках, осуществляет их коррекцию, сортировку и поиск по одному или нескольким типам запросов (по заданному полю) с последующей выдачей всех названий статей, имеющих в фактографическом описании, на указанное устройство.

Библиографический список литературы, включенный в АБИП-СИ, составлен по материалам иностранных и отечественных авторов по состоянию на начало 1989 г., преимущественно имеющимся в лабораториях и фондах библиотек страны, содержит более 10 000 наименований и постоянно наращивается.

Автоматизированная система обработки изображения, формируемого растровым электронным микроскопом, состоит из электронного микроскопа РЭММА-202, микроЭВМ «Электроника 60» и устройства ввода изображения в микроЭВМ, которое обеспечивает ввод изображения размером 256×256 элементов с 16 градациями яркости.

Этот комплекс аппаратуры позволяет считывать полутоновое изображение в реальном масштабе времени (20 мс), записывать из ЭВМ в память устройства ввода обработанное полутоновое изображение и осуществлять контроль вводимой с РЭМ и записанной в блок памяти информации на экране ЭЛТ РЭМ и экране видеоконтрольного устройства. Программное обеспечение АСОИ позволяет бинаризовать и выделить контур изображения, определить форму и размер объектов, оценить качество синтезированной полупроводниковой пластины.

5.5.4. Языки программирования информационных устройств и систем

Важным моментом проектирования и эксплуатации ИУС является правильный выбор языка моделирования и программирования зрительной системы. Языки, используемые в ИУС, делятся на языки низкого и высокого уровней. Кроме того, особое место занимают специализированные языки программирования, являющиеся разновидностью языков высокого уровня и специально разработанные для использования в СТЗ.

Проведем краткий экскурс в историю развития языков программирования [13–20].

Все началось в 1959 г. Именно в этот год будущий основатель фирмы Intel Роберт Нойс изобрел способ изготовления микросхем, применение которых позволило в сотни раз уменьшить размеры вычислительных машин, их стоимость, а также существенно повысить их надежность. С тех пор компьютеры стали приобретать все большую популярность, количество их росло, а значит, росла и потребность в программах и программистах. Как известно, первый микропроцессор появился на свет в 1970 г. – Intel 4004. Его спроектировал Маршиан Эдвард Хофф – один из инженеров фирмы Intel, которая и по сей день является лидером производства чипов, процессоров и контроллеров. Фактически это устройство обладало возможностями, присущими сейчас каждому «калькулятору», и не более. Он мог обрабатывать только 4 бита информации, да и команд у него было немного, а значит, программирование под него было достаточно простой задачей, и потребность в языках высокого уровня не возникала. Но всего через четыре года, в 1973, был создан процессор 8008, который работал с восьмиразрядными машинными словами, а также, чуть позже, – 8080, который позволял подключать память объемом до 64 килобайт. В 1978 г. появился 16-разрядный микропроцессор 8086 с памятью до 1 мегабайта, а с ним и современный Ассемблер, который до сих пор в той или иной мере поддерживается во всех микропроцессорах $\times 86$ при работе в реальном времени. И если с предыдущими процессорами автор этих строк знаком скорее понаслышке, то первый опыт программирования он получил, работая именно с 8086. Собственно, большинство современных процессоров базируются как раз на его основе. Небольшие размеры самого процессора и также основных компонентов компьютера в те годы привели к тому, что появились так называемые РС – Personal Computer, или, проще говоря, «персоналки», т.е. машины, рассчитанные на использование одним человеком. Они занимали немного места, могли помещаться на обычном письменном столе и при этом обладали значительной вычислительной мощностью. Все это ускорило обширное распространение РС, особенно в США. Однако это вовсе не означает, что до появления РС не было потребности в средствах программирования. Еще в середине 50-х гг. вычислительные машины получили широкое распространение в университетах и научно-исследовательских институтах США и Западной Европы, и тогда же наступило время стремительного прогресса в области программирова-

ния. И новые разработки не отрицают всего того, что было сделано прежде. Компиляторы и интерпретаторы для языков Ассемблера остались важным средством программирования для любого компьютера. Но, несмотря на возможность использовать эти средства, программисты решили облегчить себе работу. Посредниками между программистами и машинами стали языки программирования нового уровня. От Ассемблера они отличались большей гибкостью и возможностью использования конструкций, подобных предложениям. Понятно, что как только появились компьютеры, нужно было сочинять для них программы. Проблема написания управляющего кода, понятного машине, стояла задолго до появления РС, например, один из первых языков программирования высокого уровня – Fortran – появился в 1957 г. Тем не менее с появлением нового типа компьютеров пришлось пересмотреть некоторые старые концепции разработки языков, ведь все старые были ориентированы на суперкомпьютеры, архитектура которых существенно отличалась от архитектуры ПК, да и задачи стояли перед ними разные. Как известно, большие машины использовались чаще всего в военных целях или при научных исследованиях.

В настоящее время используются языки программирования высшего уровня. Они работают через трансляционные программы, которые вводят «исходный код» (гибрид английских слов и математических выражений, который считывает машина), и в конечном итоге заставляют компьютер выполнять соответствующие команды, которые даются на машинном языке. Существует два основных вида трансляторов: интерпретаторы, которые сканируют и проверяют исходный код в один шаг, и компиляторы, которые сканируют исходный код для производства текста программы на машинном языке, которая затем выполняется отдельно.

5.5.4.1. Интерпретаторы

Одно часто упоминаемое преимущество интерпретаторной реализации состоит в том, что она допускает «непосредственный режим». Непосредственный режим позволяет задавать компьютеру задачу вроде PRINT 3.14159*3/2.1 и возвращает ответ, как только вы нажмете клавишу ENTER (это позволяет использовать компьютер стоимостью 3 000 долл. в качестве калькулятора стоимостью 10 долл.). Кроме того, интерпретаторы имеют специальные атрибуты, которые упрощают

отладку. Можно, например, прервать обработку интерпретаторной программы, отобразить содержимое определенных переменных, бегло просмотреть программу, а затем продолжить исполнение. Больше всего программистам нравится в интерпретаторах возможность получения быстрого ответа. Здесь нет необходимости в компилировании, так как интерпретатор всегда готов для вмешательства в вашу программу. Введите RUN, и результат вашего самого последнего изменения оказывается на экране.

Однако интерпретаторные языки имеют недостатки. Необходимо, например, иметь копию интерпретатора в памяти все время, тогда как многие возможности интерпретатора, а следовательно, и его возможности могут не быть необходимыми для исполнения конкретной программы. Слабо различимым недостатком интерпретаторов является то, что они имеют тенденцию отбивать желание к хорошему стилю программирования. Поскольку комментарии и другие формализуемые детали занимают значительное место программной памяти, люди стремятся ими не пользоваться. Программист, работающий на интерпретаторном Бейсике, с яростью пытается получить программу в 120 К в памяти емкостью 60 К, но хуже всего то, что интерпретаторы тихходны. Ими затрачивается слишком много времени на разгадывание того, что делать, вместо того, чтобы заниматься действительно делом.

При исполнении программных операторов интерпретатор должен сначала сканировать каждый оператор с целью прочтения его содержимого (что этот человек просит меня сделать?), а затем выполнить запрошенную операцию. Операторы в циклах сканируются излишне долго.

5.5.4.2. Компиляторы

Компилятор – это транслятор текста на машинный язык, который считывает исходный текст (рис. 5.27). Он оценивает его в соответствии с синтаксической конструкцией языка и переводит на машинный язык. Другими словами, компилятор не исполняет программы, он их строит. Интерпретаторы невозможно отделить от программ, которые ими прогоняются, компиляторы делают свое дело и уходят со сцены. При работе с компилирующим языком, таким как Турбо-Бейсик, вы придете к необходимости мыслить о ваших программах в признаках двух глав-

ных фаз их жизни: периода компилирования и периода прогона. Большинство программ будут прогоняться в четыре–десять раз быстрее их интерпретаторных эквивалентов. Если вы поработаете над улучшением, то сможете достичь 100-кратного повышения быстродействия. Обратная сторона монеты состоит в том, что программы, расходующие большую часть времени на работу с файлами на дисках или ожидание ввода, не смогут продемонстрировать какое-то впечатляющее увеличение скорости.

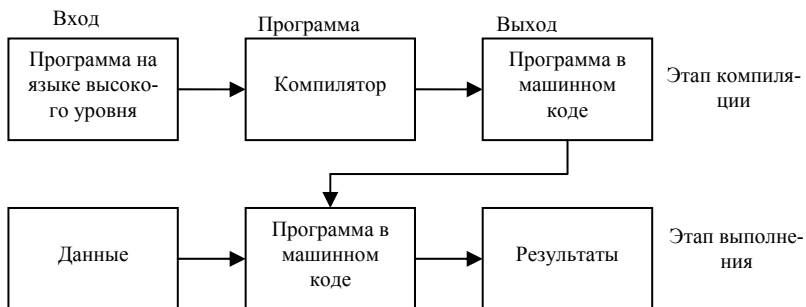


Рис. 5.27. Работа программы-компилятора

5.5.5. Классификация языков программирования

1) Машинно-ориентированные языки

Это языки, наборы операторов и изобразительные средства которых существенно зависят от особенностей ЭВМ (внутреннего языка, структуры памяти и т.д.). Машинно-ориентированные языки позволяют использовать все возможности и особенности машинно-зависимых языков:

- высокое качество создаваемых программ (компактность и скорость выполнения);
- возможность использования конкретных аппаратных ресурсов;
- предсказуемость объектного кода и заказов памяти;
- для составления эффективных программ необходимо знать систему команд и особенности функционирования данной ЭВМ;
- трудоемкость процесса составления программ (особенно на машинных языках и ЯСК), плохо защищенного от появления ошибок;

- низкая скорость программирования;
- невозможность непосредственного использования программ, составленных на этих языках, на ЭВМ других типов.

Машинно-ориентированные языки по степени автоматического программирования подразделяются на классы.

Машинный язык.

Отдельный компьютер имеет свой определенный **машинный язык** (далее – **МЯ**), ему предписывают выполнение указываемых операций над определяемыми ими операндами, поэтому **МЯ** является командным. Однако некоторые семейства ЭВМ (например, ЕС ЭВМ, ИВМ/370/ и др.) имеют единый **МЯ** для ЭВМ разной мощности. В команде любого из них сообщается информация о местонахождении операндов и типе выполняемой операции.

В новых моделях ЭВМ намечается тенденция к повышению внутренних языков машинно-аппаратным путем реализовывать более сложные команды, приближающиеся по своим функциональным действиям к операторам алгоритмических языков программирования.

Языки символического кодирования.

Языки символического кодирования (далее – **ЯСК**) так же, как и **МЯ**, являются командными. Однако коды операций и адреса в машинных командах, представляющие собой последовательность двоичных (во внутреннем коде) или восьмеричных (часто используемых при написании программ) цифр, в **ЯСК** заменены на символы (идентификаторы), форма написания которых помогает программисту легче запоминать смысловое содержание операции. Это обеспечивает существенное уменьшение числа ошибок при составлении программ.

Использование символических адресов – первый шаг к созданию **ЯСК**. Команды ЭВМ вместо истинных (физических) адресов содержат символические адреса. По результатам составленной программы определяется требуемое количество ячеек для хранения исходных промежуточных и результирующих значений. Назначение адресов, выполняемое отдельно от составления программы в символических адресах, может проводиться менее квалифицированным программистом или специальной программой, что в значительной степени облегчает труд программиста.

Автокоды.

Есть также языки, включающие в себя все возможности **ЯСК** посредством расширенного введения *макрокоманд*, они называются **автокоды**.

В различных программах встречаются некоторые достаточно часто используемые командные последовательности, которые соответствуют определенным процедурам преобразования информации. Эффективная реализация таких процедур обеспечивается оформлением их в виде специальных макрокоманд и включением последних в язык программирования, доступный программисту. Макрокоманды переводятся в машинные команды двумя путями – *расстановкой* и *генерированием*. В постановочной системе содержатся «остовы» – серии команд, реализующих требуемую функцию, обозначенную макрокомандой. Макрокоманды обеспечивают передачу фактических параметров, которые в процессе трансляции вставляются в «остов» программы, превращая её в реальную машинную программу.

В системе с генерацией имеются специальные программы, анализирующие макрокоманду, которые определяют, какую функцию необходимо выполнить, и формируют необходимую последовательность команд, реализующих данную функцию.

Обе указанные системы используют трансляторы с **ЯСК** и набор макрокоманд, которые также являются операторами автокода.

Развитые автокоды получили название **Ассемблеры**. Сервисные программы и пр., как правило, составлены на языках типа **Ассемблер**. Более полную информацию об языке **Ассемблер** см. ниже.

Макрос.

Язык, являющийся средством для замены последовательности символов, описывающих выполнение требуемых действий ЭВМ на более сжатую форму, называется **Макрос** (средство замены).

В основном **Макрос** предназначен для того, чтобы сократить запись исходной программы. Компонент программного обеспечения, обеспечивающий функционирование Макросов, называется **макропроцессором**. На макропроцессор поступает макроопределяющий и исходный текст. Реакция макропроцессора на вызов – выдача выходного текста.

Макрос одинаково может работать как с программами, так и с данными.

2) Машинно-независимые языки

Это средство описания алгоритмов решения задач и информации, подлежащей обработке. Они удобны в использовании для широкого круга пользователей и не требуют от них знания особенностей организации функционирования ЭВМ и ВС.

Подобные языки получили название высокоуровневых языков программирования. Программы, составляемые на таких языках, представляют собой последовательности операторов, структурированные согласно правилам рассматривания языка (задачи, сегменты, блоки и т.д.). Операторы языка описывают действия, которые должна выполнять система после трансляции программы на **МЯ**.

Таким образом, командные последовательности (процедуры, подпрограммы), часто используемые в машинных программах, представлены в высокоуровневых языках отдельными операторами. Программист получил возможность не расписывать в деталях вычислительный процесс на уровне машинных команд, а сосредоточиться на основных особенностях алгоритма.

3) Проблемно-ориентированные языки

С расширением областей применения вычислительной техники возникла необходимость формализовать представление постановки и решение новых классов задач. Необходимо было создать такие языки программирования, которые, используя в данной области обозначения и терминологию, позволили бы описывать требуемые алгоритмы решения для поставленных задач, ими стали **проблемно-ориентированные языки**. Эти языки, ориентированные на решение определенных проблем, должны обеспечить программиста средствами, позволяющими коротко и четко формулировать задачу и получать результаты в требуемой форме.

Проблемных языков очень много, например:

Фортран, Алгол – языки, созданные для решения математических задач;

Simula, Слэнг – для моделирования;

Лисп, Снобол – для работы со списочными структурами.

4) Универсальные языки

Универсальные языки были созданы для широкого круга задач: коммерческих, научных, моделирования и т.д. Первый универсальный язык был разработан фирмой IBM, ставший в последовательности языков **Пл/1**. Второй по мощности универсальный язык

называется **Алгол-68**. Он позволяет работать с символами, рядами, числами с фиксированной и плавающей запятой. **Пл/1** имеет развитую систему операторов для управления форматами, для работы с полями переменной длины, с данными, организованными в сложные структуры, и для эффективного использования каналов связи. Язык учитывает включенные во многие машины возможности прерывания и имеет соответствующие операторы. Предусмотрена возможность параллельного выполнения участков программ.

Программы в **Пл/1** компилируются с помощью автоматических процедур. Язык использует многие свойства **Фортрана**, **Алгола**, **Кобола**. Однако он допускает не только динамическое, но и управляемое и статистическое распределение памяти.

5) Диалоговые языки

Появление новых технических возможностей поставило задачу перед системными программистами создать программные средства, обеспечивающие оперативное взаимодействие человека с ЭВМ, их назвали **диалоговыми языками**.

Эти работы велись в двух направлениях. Создавались специальные управляющие языки для обеспечения оперативного воздействия на прохождение задач, которые составлялись на любых ранее не разработанных (не диалоговых) языках. Разрабатывались также языки, которые кроме целей управления обеспечивали бы описание алгоритмов решения задач.

Необходимость обеспечения оперативного взаимодействия с пользователем потребовала сохранения в памяти ЭВМ копии исходной программы даже после получения объектной программы в машинных кодах. При внесении изменений в программу с использованием диалогового языка система программирования с помощью специальных таблиц устанавливает взаимосвязь структур исходной и объектной программ. Это позволяет осуществить требуемые редакционные изменения в объектной программе.

Одним из примеров диалоговых языков является **Бэйсик**.

Бэйсик использует обозначения, подобные обычным математическим выражениям. Многие операторы являются упрощенными вариантами операторов языка **Фортран**. Поэтому этот язык позволяет решать достаточно широкий круг задач.

6) Непроцедурные языки

Непроцедурные языки составляют группу языков, описываю-

щих организацию данных, обрабатываемых по фиксированным алгоритмам (табличные языки и генераторы отчетов), и языков связи с операционными системами.

Позволяя четко описывать как задачу, так и необходимые для её решения действия, таблицы решений дают возможность в наглядной форме определить, какие условия должны быть выполнены, прежде чем переходить к какому-либо действию. Одна таблица решений, описывающая некоторую ситуацию, содержит всевозможные блок-схемы реализаций алгоритмов решения.

Табличные методы легко осваиваются специалистами любых профессий. Программы, составленные на табличном языке, удобно описывают сложные ситуации, возникающие при системном анализе.

Среди высокоуровневых языков для использования в СТЗ необходимо прежде всего ориентироваться на языки программирования, обеспечивающие доступ и возможность работы с регистрами нестандартных внешних устройств. К таким языкам относятся Си, Паскаль, Фортран, Квейсик и др. Сравнение характеристик языков высокого уровня позволяет выделить Квейсик и Си.

В языке Квейсик отражены общие черты архитектуры ЭВМ. Он обеспечивает возможность работы с битами, доступ к регистрам внешних устройств, обработку прерываний (позволяющие писать программы управления внешними устройствами). Квейсик оперирует с вещественными переменными, арифметическими выражениями и элементарными функциями и обеспечивает высокую скорость выполнения программ, простой пользовательский интерфейс, однородность и интерактивность, переносимость (мобильность) на другие типы ЭВМ.

Достоинствами языка Квейсик являются простота изучения, легкость редактирования, возможность работы в диалоговом режиме (что представляет большие удобства при моделировании программ СТЗ). Недостатками языка Квейсик являются невысокое быстродействие и большой объем (до 16 Кбайт), занимаемый ОЗУ ЭВМ.

Си – это язык программирования общего назначения, хорошо известный своей эффективностью, экономичностью и переносимостью. Указанные преимущества Си обеспечивают хорошее качество разработки почти любого вида программного продукта. Использование Си в качестве инструментального языка позволяет получать быстрые и компактные программы. Во многих случаях программы, написанные на Си, сравнимы по скорости с программами, написанными на языке

Ассемблер. При этом они имеют лучшую наглядность и их более просто сопровождать. Си сочетает эффективность и мощность в относительно малом по размеру языке.

Си – это замечательный язык, и хотя некоторым он не нравится, но все же большинство программистов его любят. На Си вы можете создавать программы, которые делают все, что вы пожелаете. Нет другого такого языка, который бы так же стимулировал к программированию. Создается впечатление, что остальные языки программирования воздвигают искусственные препятствия для творчества, а Си – нет. Использование этого языка позволяет сократить затраты времени на создание работающих программ. Си позволяет программировать быстро, эффективно и предсказуемо. Еще одно преимущество Си заключается в том, что он позволяет использовать все возможности вашей ЭВМ. Этот язык создан программистом для использования другими программистами, чего о других языках программирования сказать нельзя.

Язык Си имеет существенные особенности:

1. Си обеспечивает полный набор операторов структурного программирования. Си предлагает необычно большой набор операций. Многие операции Си соответствуют машинным командам и поэтому допускают прямую трансляцию в машинный код. Разнообразие операций позволяет выбирать их различные наборы для минимизации результирующего кода.

2. Си поддерживает указатели на переменные и функции. Указатель на объект программы соответствует машинному адресу этого объекта. Посредством разумного использования указателей можно создавать эффективно выполняемые программы, так как указатели позволяют ссылаться на объекты тем же самым путем, как это делает машина. Си поддерживает арифметику указателей и тем самым позволяет осуществлять непосредственный доступ и манипуляции с адресами памяти.

3. В своем составе Си содержит препроцессор, который обрабатывает текстовые файлы перед компиляцией. Среди его наиболее полезных приложений при написании программ на Си являются: определение программных констант, замена вызовов функций аналогичными, но более быстрыми макросами, условная компиляция. Препроцессор не ограничен процессированием только исходных

текстовых файлов Си, он может быть использован для любого текстового файла.

4. Си – гибкий язык, позволяющий принимать в конкретных ситуациях самые разные решения. Тем не менее Си налагает незначительные ограничения в таких, например, действиях, как преобразование типов. Во многих случаях это является достоинством, однако программисты должны хорошо знать язык, чтобы понимать, как будут выполняться их программы.

Так же, как и особенностей, в языке Си присутствует много недостатков. Ведь от них не защищен ни один проект, в том числе проект разработки и выполнения программ на языке Си.

Язык Си предъявляет достаточно высокие требования к квалификации использующего его программиста. При изучении Си желательно иметь представление о структуре и работе компьютера. Большую помощь и более глубокое понимание идей Си как языка системного программирования обеспечит хотя бы минимальное знание языка Ассемблер. Уровень старшинства некоторых операторов не является общепринятым, некоторые синтаксические конструкции могли бы быть лучше. Тем не менее, как оказалось, Си – чрезвычайно эффективный и выразительный язык, пригодный для широкого класса задач.

Си++.

Безусловно, Си++ восходит, главным образом, к Си. Си сохранен как подмножество, поэтому сделанного в Си акцента на средствах низкого уровня достаточно, чтобы справляться с самыми насущными задачами системного программирования. Си, в свою очередь, многим обязан своему предшественнику BCPL.

Название Си++ – изобретение лета 1983 г. Более ранние версии языка использовались начиная с 1980 г. и были известны как «Си с Классами». Первоначально язык был придуман потому, что автор хотел написать событийно управляемые модели, для чего был бы идеален **Simula67**, если не принимать во внимание эффективность. «Си с Классами» использовался для крупных проектов моделирования, в которых строго тестировались возможности написания программ, требующих (только) минимального пространства памяти и времени на выполнение. В «Си с Классами» не хватало перегрузки операций, ссылок, виртуальных функций и многих деталей. Си++ был впервые введен за пределами исследовательской группы автора

в июле 1983 г. Однако тогда многие особенности Си++ были еще не придуманы.

Название Си++ придумал Рик Масситти. Название указывает на эволюционную природу перехода к нему от Си. «++» – это операция приращения в Си. Чуть более короткое имя Си+ является синтаксической ошибкой, кроме того, оно уже было использовано как имя совсем другого языка. Знатоки семантики Си находят, что Си++ хуже, чем Си. Названия D язык не получил, поскольку он является расширением Си и в нем не делается попыток исцелиться от проблем путем выбрасывания различных особенностей.

Си++ – это универсальный язык программирования, задуманный так, чтобы сделать программирование более приятным для серьезного программиста. За исключением второстепенных деталей Си++ является надмножеством языка программирования Си. Помимо возможностей, которые дает Си, Си++ предоставляет гибкие и эффективные средства определения новых типов. Используя определения новых типов, точно отвечающих концепциям приложения, программист может разделять разрабатываемую программу на легко поддающиеся контролю части. Такой метод построения программ часто называют абстракцией данных. Информация о типах содержится в некоторых объектах типов, определенных пользователем. Такие объекты просты и надежны в использовании в тех ситуациях, когда их тип нельзя установить на стадии компиляции. Программирование с применением таких объектов часто называют объектно-ориентированным. При правильном использовании этот метод дает более короткие, проще понимаемые и легче контролируемые программы.

Изначально Си++ был разработан, чтобы автору и его коллегам не приходилось программировать на Ассемблере, Си или других современных языках высокого уровня. Основным его предназначением было сделать написание хороших программ более простым и приятным для отдельного программиста. Плана разработки Си++ на бумаге никогда не было. Проект, документация и реализация двигались одновременно. Разумеется, внешний интерфейс Си++ был написан на Си++. Никогда не существовало «Проекта Си++» и «Комитета по разработке Си++». Поэтому Си++ развивался и продолжает развиваться во всех направлениях, чтобы справляться со сложностями, с которыми сталкиваются пользователи, а также в процессе дискуссий автора с его друзьями и коллегами.

В качестве базового языка для Си++ был выбран Си, потому что он:

- многоцелевой, лаконичный и относительно низкого уровня;
- отвечает большинству задач системного программирования;
- идет везде и на всем;
- пригоден в среде программирования UNIX.

В Си есть свои сложности, но в наспех спроектированном языке тоже были бы свои, а сложности Си нам известны. Самое главное, работа с Си позволила «Си с Классами» быть полезным (правда, неудобным) инструментом в ходе первых месяцев раздумий о добавлении к Си *Simula* – подобных классов.

Си++ стал использоваться шире, и по мере того, как возможности, предоставляемые им помимо возможностей Си, становились все более существенными, вновь и вновь поднимался вопрос о том, сохранять ли совместимость с Си. Ясно, что, отказавшись от определенной части наследия Си, можно было бы избежать ряда проблем. Это не было сделано, потому что:

- есть миллионы строк на Си, которые могли бы принести пользу в Си++ при условии, что их не нужно было бы полностью переписывать с Си на Си++;

- есть сотни тысяч строк библиотечных функций и сервисных программ, написанных на Си, которые можно было бы использовать из или на Си++ при условии, что Си++ полностью совместим с Си по загрузке и синтаксически очень похож на Си;

- есть десятки тысяч программистов, которые знают Си и которым поэтому нужно только научиться использовать новые особенности Си++, а не заново изучать его основы;

- поскольку Си++ и Си будут использоваться на одних и тех же системах одними и теми же людьми, отличия должны быть либо очень большими, либо очень маленькими, чтобы свести к минимуму ошибки и недоразумения.

Позднее была проведена проверка определения Си++, чтобы удостовериться в том, что любая конструкция, допустимая и в Си, и в Си++, действительно означает в обоих языках одно и то же.

Си++ был развит из языка программирования Си и за очень немногими исключениями сохраняет Си как подмножество. Базовый язык Си, подмножество Си++, спроектирован так, что имеется очень близкое соответствие между его типами, операциями и операторами

и компьютерными объектами, с которыми непосредственно приходится иметь дело: числами, символами и адресами. За исключением операций свободной памяти `new` и `delete`, отдельные выражения и операторы Си++ обычно не нуждаются в скрытой поддержке во время выполнения или подпрограммах.

Одним из первоначальных предназначений Си было применение его вместо программирования на Ассемблере в самых насущных задачах системного программирования. Когда проектировался Си++, были приняты меры, чтобы не ставить под угрозу успехи в этой области. Различие между Си и Си++ состоит в первую очередь в степени внимания, уделяемого типам и структурам. Си выразителен и снисходителен. Си++ еще более выразителен, но чтобы достичь этой выразительности, программист должен уделить больше внимания типам объектов. Когда известны типы объектов, компилятор может правильно обрабатывать выражения, тогда как в противном случае программисту пришлось бы задавать действия с мучительными подробностями. Знание типов объектов также позволяет компилятору обнаруживать ошибки, которые в противном случае остались бы до тестирования. Заметьте, что использование системы типов для того, чтобы получить проверку параметров функций, защитить данные от случайного искажения, задать новые операции и т.д., само по себе не увеличивает расходов по времени выполнения и памяти.

Особое внимание, уделенное при разработке структуры Си++, отразилось на возрастании масштаба программ, написанных со времени разработки Си. Маленькую программу (меньше 1 000 строк) вы можете заставить работать с помощью грубой силы, даже нарушая все правила хорошего стиля. Для программ больших размеров это не совсем так. Если программа в 10 000 строк имеет плохую структуру, то вы обнаружите, что новые ошибки появляются так же быстро, как удаляются старые. Си++ был разработан так, чтобы дать возможность разумно структурировать большие программы таким образом, чтобы для одного человека не было непомерным справиться с программами в 25 000 строк. Существуют программы гораздо больших размеров, однако те, которые работают, в целом, как оказывается, состоят из большого числа почти независимых частей, размер каждой из которых намного ниже указанных пределов.

Естественно, сложность написания и поддержки программы за-

висит от сложности разработки, а не просто от числа строк текста программы, так что точные цифры, с помощью которых были выражены предыдущие соображения, не следует воспринимать слишком серьезно.

Существенным критерием при разработке языка была простота. Там, где возникал выбор между упрощением руководства по языку и другой документации и упрощением компилятора, выбиралось первое. Огромное значение также придавалось совместимости с Си, это помешало удалить синтаксис Си.

В Си++ нет типов данных высокого уровня и нет первичных операций высокого уровня. В нем нет, например, матричного типа с операцией обращения или типа строка с операцией конкатенации. Если пользователю понадобятся подобные типы, их можно определить в самом языке. По сути дела, основное, чем занимается программирование на Си++, – это определение универсальных и специально-прикладных типов. Хорошо разработанный тип, определяемый пользователем, отличается от встроенного типа только способом определения, но не способом использования.

Исключались те черты, которые могли бы повлечь дополнительные расходы памяти или времени выполнения. Например, мысли о том, чтобы сделать необходимым хранение в каждом объекте «хозяйственной» информации, были отвергнуты. Если пользователь описывает структуру, состоящую из двух 16-битовых величин, то структура поместится в 32-битовый регистр.

Си++ проектировался для использования в довольно традиционной среде компиляции и выполнения, среде программирования на Си в системе UNIX. Средства обработки особых ситуаций и параллельного программирования, требующие нетривиальной загрузки и поддержки в процессе выполнения, не были включены в Си++. Вследствие этого реализация Си++ очень легко переносима. Однако есть полные основания использовать Си++ в среде, где имеется гораздо более существенная поддержка. Такие средства, как динамическая загрузка, пошаговая трансляция и база данных определений типов, могут с пользой применяться без воздействия на язык.

Тесты к главе 5

1. Первый (верхний) этап проектирования не включает:

- а) Оценку значимости параметров, выбранных для характеристики объекта.
 б) Структурную оптимизацию.
 в) Моделирование системы.
2. Сумма коэффициентов предпочтительности (a_{ij}) двух сравниваемых систем равна:
 а) 0.
 б) 1.
 в) 2.
3. Формула $S_{Fj} = \sum_{i=1}^p a_{ij} S_{MHi}$ определяет:
 а) Автономные затраты.
 б) Долевые затраты.
 в) Общие затраты.
4. Третий этап поиска оптимального технического решения для ФСА:
 а) Формирование дерева целей.
 б) Формирование набора целей и вариантов реализации основных функций путем построения морфологической карты.
 в) Построение структурной и функциональной модели ИС.
5. Качественная оценка Q_{yi} , позволяющая дать характеристику выбранных методов контроля, определяется по формуле
 а) $Q_y = \sum_{i=1}^m \rho_i^{\text{отн}} \rho_{yi}^{\text{отн}}$.
 б) $Q_y = \sum_{i=1}^m \rho_i^{\text{отн}} \rho_y^{\text{отн}}$.
 в) $Q_y = \rho^{\text{отн}} \sum_{i=1}^m \rho_{yi}^{\text{отн}}$.
6. $\lim_{\sigma^2 \rightarrow 0} C(\sigma^2) \Rightarrow ?$
 а) ∞ .
 б) 0.
 в) 1.
7. Число составляющих максимальных потерь на эксплуатацию оборудования ($\Pi_{\max} = \sum ?$):
 а) 2.
 б) 3.
 в) 4.
8. Информация, содержащаяся в цветном изображении, больше информации, содержащейся в аналогичном черно-белом изображении:
 а) В 3 раза.

- б) В зависимости от параметров изображения.
в) В 8 раз.

9. Эффекта «смазывания» изображения не будет при выполнении условия:

- а) $C_1^n V_{\text{дти}}^{\text{доп}} < V_{\text{дти}}^{\text{доп}} < C_2^n V_K$.
б) $C_1^n V_{\text{ти}}^{\text{доп}} < V_{\text{ти}}^{\text{доп}} < C_2^n V_K$.
в) $V_{\text{дти}}^{\text{доп}} < C_1^n V_{\text{дти}}^{\text{доп}} < C_2^n V_K$.

10. Время обработки информации ИС цифрового типа не включает время, необходимое для:

- а) Установки требуемого освещения рабочей зоны блоком освещения.
б) Считывания (записи) ТИ в буферное устройство.
в) Передачи, необходимой информации на исполнительное устройство.

11. Укажите неверное:

- а) Время формирования ТИ равно

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} \tau_{\text{ТКи}} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} M_i^{\text{ТИ}} N_i^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}i}.$$

- б) Время считывания ТИ в буферное запоминающее устройство равно

$$t_4^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} \tau_{\text{ЭОБР}}.$$

- в) Быстродействие видеопроцессора определяется как

$$t_6^{\text{ПЦЧБ}} = t_{\text{ВК}} + t_{\text{ПОИСК}} + t_{\text{СЛ}} = \tau_{\text{БЗУ}} + n_B \frac{K_1}{N_{\text{КВП}t_{\text{T}}}} + \frac{K_2}{N_{\text{КВП}f_{\text{T}}}}.$$

12. Быстродействие ИС с несколькими оптическими корреляторами относительно одноканальной системы:

- а) Выше.
б) На одном уровне.
в) Ниже.

13. Быстродействие робототехнической системы, включающей ИС, работа и средства формирования рабочей зоны, оценивается:

- а) $T_{\text{РС}} = T_{\text{СФРС}} + T_{\text{р}}$.
б) $T_{\text{РС}} = T_{\text{СФРС}} + T_{\text{ИС}} - T_{\text{р}}$.
в) $T_{\text{РС}} = T_{\text{ИС}} + T_{\text{р}}$.

14. Число информации I_0 , которое необходимо переработать/запомнить, определяется как:

- а) $I_0 = N_k N_s (\log_2 m_1 + \log_2 m_2)$.

б) $I_0 = N_k M_3 (\log_2 m_1 + \log_2 m_3)$.

в) $I_0 = N_k N_3 (\log_2 m_1 + \log_2 m_2 + \log_2 m_4)$.

15. Зависимость стоимости системы от ее погрешности:

- а) Прямая.
- б) Обратно пропорциональная.
- в) Экспоненциальная.

16. Какой метод не относится к методам online-программирования?

- а) Teach-In.
- б) Playback.
- в) Study kit.

17. Какой блок программного обеспечения содержит программы выделения границ и пороговой обработки?

- а) Предварительная обработка.
- б) Синтез.
- в) Сегментация.

18. Это система, состоящая из компилятора, переводящего исходный код программы в промежуточное представление, например, в байт-код или р-код, и собственно интерпретатора, который выполняет полученный промежуточный код:

- а) Простой интерпретатор.
- б) Интерпретатор компилирующего типа.
- в) Компиляция.

19. Укажите язык программирования, не относящийся к объектно-ориентированным:

- а) C++.
- б) Prolog.
- в) Visual Basic.

20. Укажите язык, не поддерживающий параллельные вычисления:

- а) Ada.
- б) Oz.
- в) Pascal.

Контрольные вопросы к главе 5

1. Дайте определение и укажите назначение САПР ИС.
2. Перечислите уровни и элементы структурной схемы САПР ИС.

3. Дайте определение структурной и параметрической оптимизаций, применяемых в САПР ИС.
4. Поясните методику структурного синтеза ИУС на основе функционально-стоимостного анализа.
5. Изложите схему применения методов функционально-стоимостного анализа.
6. Поясните алгоритм проведения функционально-стоимостного анализа, реализующий метод расстановки приоритетов.
7. Приведите блок-схему экспресс-ФСА и объясните её работу.
8. Поясните особенности ФСА при оптимизации структуры ИС. Приведите блок-схему алгоритмов ФСА при решении оптимизационных задач.
9. Приведите примеры применения ФСА при проектировании ИУС.
10. Как производится оценка погрешности определения координат объекта при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию ИУС?
11. Приведите расчёт объёма видеoinформации, перерабатываемой ИУС.
12. Приведите расчёт памяти ИУС.
13. Приведите расчёт быстродействия ИУС.
14. Изложите методику расчёта ИУС применительно к системам технического зрения роботов.
15. Каковы основные составные элементы и программное обеспечение программно-аппаратного комплекса проектирования ИУС?
16. Перечислите основные блоки программного обеспечения СТЗ.
17. Какие языки программирования информационных систем вам известны?

Список литературы к главе 5

1. *Системы* технического зрения: справочник / В.И. Сыряжкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др.; под общ. ред. В.И. Сыряжкина, В.С. Титова. Томск, 1992. 367 с.
2. *Норенков И.П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. 311 с.
3. *Комплекс* общепромышленных руководящих методических материалов по созданию АСУ и САПР. М.: Статистика, 1980. 119 с.
4. *Титов В.С., Сыряжкин В.И., Ширабакина Т.А.* Техничко-экономический анализ разработки средств визуального контроля: учеб. пособие. Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 1995. 98 с.
5. *Скорняков Э.П., Шведова В.В., Мельникова Л.И.* Оценка технического уровня продукции – необходимое условие выхода на рынок: учеб. пособие. М.: Институт промышл. собст. и инноватики, 1993. 88 с.
6. *Моисеева Н.К., Карпухин М.Г.* Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988. 192 с.
7. *Тихонов В.И.* Статистическая радиоэлектроника. М.: Сов. радио, 1966.

8. *Узилевский В.А.* Передача, обработка и воспроизведение цветных изображений. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.
9. *Кориков А.М., Сырякин В.И., Титов В.С.* Корреляционные системы роботов. Томск: Радио и связь, Том. отд-ние, 1990. 264 с.
10. *Хвоц С.Т., Варлинский Н.Н., Попов Е.А.* Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 640 с.
11. *Мошин В.И. и др.* Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
12. *САПР.* URL: dic.academic.ru
13. *Системы автоматизированного проектирования (САПР).* URL: <http://wiki.mvтом.ru>
14. *Основы систем автоматизированного проектирования.* URL: <http://www.bourabai.kz/cm/cad.htm>
15. *Ваулин А.С.* Языки программирования. М., 1993. Кн. 5.
16. *Терренс П.* Языки программирования: разработка и реализация. М., 1979.
17. *Касвандс Э.Г.* Введение в программирование на языке Ассемблер. М., 1982. Ч. 1.
18. *Хротко Г.* Языки программирования высокого уровня. М., 1982.
19. *Малютин Э.А., Малютин Л.В.* Языки программирования. М., 1982.
20. *Ушкова В.* Новые языки программирования и тенденции их развития. М., 1982.
21. *Хьювенен Э., Сеппенен Й.* Мир Лиспа. М., 1990. Т. 1.
22. *Янг С.* Алгоритмические языки реального времени. М., 1985.

Глава 6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

6.1. Введение

Информационные устройства и системы применяются в различных сферах человеческой жизни. Информационные устройства используются в промышленности, здравоохранении, сельском хозяйстве и др. Они помогают управлять комплексом мероприятий в данных отраслях на качественно новом уровне. Например, применение информационных технологий в медицине – это возможность перехода медицинского обслуживания на более высокую ступень.

В данной главе рассмотрены ИУС, использующиеся в технической и медицинской диагностике, в лечебных целях и обеспечении безопасности территорий.

6.2. Информационные системы микро- и мини-роботов

В настоящее время можно увидеть футбол на обычном письменном столе, а в качестве футболистов выступают крохотные аппараты размером с монетку. При этом они отличаются заметным интеллектом, обладают зрением и способны общаться друг с другом, согласовывая действия в атаке и обороне. А стоимость подобной футбольной команды из трех игроков, футбольного поля, мяча и ПО-«тренера» в исходных текстах укладывается в тысячу долларов [11].

За счет чего стали возможны сегодня подобные технологичные развлечения? Во многом благодаря развитию молодого направления микророботов (или микроботов). А их появление в свою очередь неразрывно связано с двумя инженерными тенденциями:

- 1) возникновением недорогих и производительных микроконтроллеров (понятие «микробот» раскрывается как «мобильный робот на базе микроконтроллера»);

- 2) выпуском массовых микроэлектромеханических (MEMS) элементов.

Микроконтроллеры («компьютеры-в-чипе»), объединяющие в едином модуле все элементы «большого» компьютера (процессор, память, службу взаимодействия с периферийными устройствами и т.д.), появились на рынке по доступным ценам в начале 90-х гг. прошлого века. И практически сразу, в 1992 г., был создан, пожалуй, первый широко известный двухколесный микробот Monsieur массой 1,5 г, занесенный в Книгу рекордов Гиннеса. Он умещался в 1 см³, был спроектирован инженерами Seiko Epson, развивал скорость 1,13 см/с и даже умел танцевать. А через десять лет его улучшенные варианты Monsieur II-P, общаясь через Bluetooth-интерфейс, научились исполнять балетные танцы целой группой.

Тогда же, в середине 90-х, получила массовое распространение технология микроэлектромеханики (см., например, PC Week/RE, N 5/2005, с. 30 – «Коротко о MEMS», Андрей Борзенко), которая берет начало в 40-х гг., когда с помощью анизотропного травления кремния удалось разместить непосредственно на кристалле вычислителя различные механические микродетали, функционирующие под управлением электроники. Первые миниатюрные цифровые измерительные датчики были созданы в 70-х в кливлендском университете Case Western Reserve (США), а сам термин MEMS появился в 1987 г. в ходе научных конференций по микродинамике, проходивших в американском городе Солт-Лейк-Сити. В Европе, кстати, вместо микроэлектромеханики используют термин «микросистемы», а в Японии – «микромашинь».

Система считается относящейся к классу MEMS, если она:

- отличается малыми размерами;
- выполняет пространственные действия с высокой точностью;
- управляется электроникой;
- характеризуется гибкой архитектурой;
- надежна и подходит для массового производства;
- имеет низкую стоимость.

Интерес к потенциалу микроконтроллеров и MEMS-систем со стороны разработчиков роботов проявился сразу, и в научных кругах быстро стали зарождаться новые направления исследований. Сандийская лаборатория (г. Сандия) Министерства энергетики США в 90-х гг. одной из первых запустила программу «Маленькие умные машины». Ее участники сосредоточились на задачах быстрого проектирования и производства мини- и микромашин, ориентирован-

ных на нужды служб спасения и военных. Среди их наработок – серия гусеничных роботов RATLER (от 15 см до метра в длину), предназначенных для длительных автономных путешествий в сложных условиях (в частности, на Луне), и маленькие аппараты MARV (четыре или шесть колес в зависимости от модели), способные двигаться в направлении источника радиосигнала. Они полностью собраны из коммерчески распространяемых деталей; оригинальны только миниатюрные радиодатчики. MARV умещается в кубическом дюйме, управляется двумя электромоторчиками, оборудован видеокамерой, а все управление сосредоточено в бортовом модуле с ПЗУ 8 Кб. При столь малых размерах аппарат хорошо собирает информацию и может быть дополнительно оборудован датчиками различных типов – например, в ходе экспериментов он помогал пожарным выявлять места возгорания. Существует и гусеничный вариант MARV, за минуту преодолевающий 50 см (рис. 6.1, 6.2).

Работы по данному проекту в лаборатории продолжаются, в последние годы особое внимание уделяется вопросам автоматической сборки деталей размером в десятки и сотни микрон, а также эволюционным алгоритмам управления большим количеством (сотнями миллионов) роботов-малышей, что свидетельствует о растущем интересе к нанотехнологиям. В лаборатории также создано ПО, предоставляющее разработчику удобный интерфейс управления большим количеством (сотнями тысяч) аппаратов.

Заметный спрос на мини- и микророботы сосредоточен в следующих областях.

Медицина. Миниатюрные аппараты уже сегодня способны передвигаться по сосудам человеческого тела, добираться до пораженных органов, выяснять их состояние и при необходимости доставлять к больному участку лекарства. В дальнейшем такие устройства научатся выполнять хирургические операции без внешнего вскрытия организма, а по мере уменьшения размеров нанороботы смогут обеспечить бесперебойную работу всех живых клеток, автоматически заменяя устаревший материал. Нуждаются в автоматизации и различные диагностические процедуры нового поколения, а также микрохирургия.

С особым интересом ожидают нанороботов нейрофизиологи. Будучи загружены в мозг, молекулярные автоматы смогут следить за функционированием каждого нейрона, проанализируют все их возможные со-

стояния и связи друг с другом и построят точную цифровую матрицу мозга, которую затем можно будет «выполнять» на компьютере. Кроме того, нанороботы научатся не только снимать показания нейронов, но и изменять их состояние, что позволит «загружать» в мозг матрицу мышления, скопированную с другого человека.

Диагностика технологического оборудования. Большинство современных промышленных предприятий отличается разветвленной кабельной и трубопроводной инфраструктурой. Однако ее обслуживание обычно сильно затруднено из-за большого количества, запутанности и малых размеров труб и кабельных оболочек, так что даже казалась бы незначительный засор может привести к многочасовой парализации всей деятельности. Поэтому современные роботы активно учатся передвигаться по изогнутым трубам, хотя при этом возникает множество инженерных проблем: для движения по широким каналам приходится применять одни технологии, а по узким – совсем другие, горизонтальная или вертикальная ориентация и степень изгиба труб также существенно затрудняют проектирование и т.д.

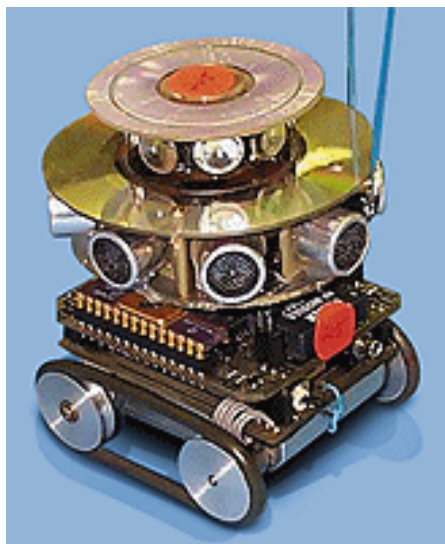


Рис. 6.1. Мини-робот Millibot

Микромеханика. Упомянутые MEMS-технологии связаны с тенденцией промышленности к созданию все более и более миниатюрных управляющих элементов, которые сегодня, например, встраиваются во все мобильные телефоны, но автоматизация процесса их сборки немыслима без микроманипуляторов. Это направление постепенно сближается с наномеханикой, где в качестве элементов движущихся конструкций планируется активно задействовать молекулы.

Кроме того, самые разные формы интереса к микророботам проявляют энергетики, машино- и приборостроители, биотехнологи, связисты и экологи.

Классическая модель робота состоит из модулей сбора информации (набора датчиков, анализирующих свое и окружающее состояние), управления двигателем, устройства движения (колесного, гусеничного или шагающего) и принятия решений. Каждый из этих блоков, особенно если дело касается создания микроаппаратов, требует тесного взаимодействия специалистов из самых разных областей науки и техники, что во всем мире традиционно считается трудной организационной задачей. Ведь для этого в едином конструктивном решении надо объединить как электронные, так и крохотные механические элементы, двигатель, источник питания, а также средства связи, сбора информации и т.д.

Как правило, современные микроконтроллеры пока не отличаются выдающимися характеристиками, и в микророботах задействуются 8- или 16-разрядные платы с ОЗУ 8–64 Кб и быстродействием в несколько миллионов операций в секунду. Поэтому подготовка для них сложных микропрограмм, реализующих алгоритмы искусственного интеллекта и иерархическое (а подчас и распределенное) управление множеством периферийных элементов в реальном времени, а также необходимость отладки в практических проектах остается весьма нелегким делом.

Существенно отличаются от характеристик крупных автоматов и кинематические свойства «малышей». Если при проектировании больших устройств приходится учитывать влияние гравитации, то для микроаппаратов она почти не играет роли. В то же время растет влияние сил трения, начинает проявляться сложно предсказуемый эффект «прилипания-скольжения» (сила трения постоянно колеблется), развиваются стохастические процессы внутри самого робота

(при работе аппарат выделяет тепло и «перегревается»), а так как при снижении размеров деталей возникает броуновское движение, то в результате микроробот просто разваливается). Заметно увеличивается и воздействие сил поверхностного натяжения, для крупных устройств неактуальное.

Кроме того, чем меньше размеры робота, тем большую роль в организации его движения начинает играть инертность окружающей среды. Например, оказывается, что ее влияние позволяет создавать плавающие «нити» миллиметровой толщины длиной не более 2–3 см, которые за счет волнообразных движений способны перемещаться в жидкости или газе со скоростью несколько миллиметров в секунду.

В рамках микромашинного проекта компаний Mitsubishi Electric, Sumitomo Electric Industries и исследовательского института фирмы Matsushita с бюджетом 206 млн долл. разработан аппарат сантиметровой длины и массой в несколько граммов: передвигаясь по трубопроводной инфраструктуре электростанций, он при необходимости может выполнять в них восстановительные мероприятия.

Составленный из сегментов робот Moccasin II с пневматическим двигателем был создан учеными университета Южной Каролины. Он умеет двигаться по трубам диаметром в несколько десятков сантиметров, разворачиваться в них под прямым углом и подниматься вверх. Оборудован Moccasin II видеокамерой, источником света и датчиком вибраций.

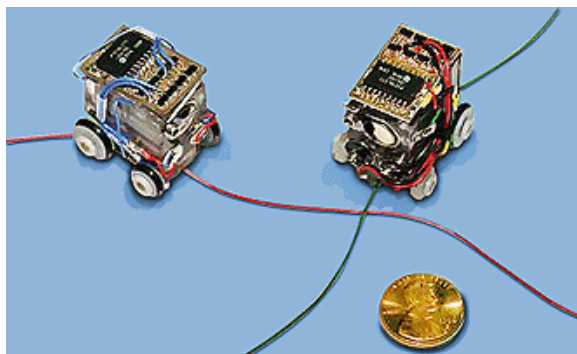


Рис. 6.2. Микроробот MARV

«Малыши» длиной в пару сантиметров, спроектированные Институтом проблем механики РАН, обучены перемещению по трубам диаметром 0,5 см. Они могут применяться в медицине, позволяя выполнять прямую диагностику внутренних органов человека и даже доставлять лекарства непосредственно к больному месту. Однако для промышленного выпуска таких аппаратов требуется финансирование.

Схожее устройство Китайской академии наук обучилось перемещаться в сосудах трехмиллиметрового диаметра, и ученые утверждают, что это далеко не предел.

В Институте океанологии РАН разработан робот ГНОМ длиной несколько десятков сантиметров и массой 2 кг. Он перемещается в воде со скоростью 1,5 м/с и способен погружаться на глубину до 150 м. На борту ГНОМа установлены цветная видеокамера, прожекторы и различные датчики, а данные на Землю передаются по кабелю.

В шведском университете города Линкапинг созданы крохотные полимерные роботы размером в десятитысячные доли метра, научившиеся действовать в организме человека, захватывая отдельные клетки и бактерии.

В Калифорнийском университете Лос-Анджелеса разработан аппарат тоньше человеческого волоса, в котором в качестве «двигателя» установлен микромускул крысы. Его можно применять в самых разных областях – от помощи парализованным людям в самостоятельном дыхании до заделки обшивки космических станций, поврежденной микрометеоритами. Передвигается устройство со скоростью 40 мкм/с.

Экспериментаторы из Бельгии, Франции и Швейцарии создали робот InsBot, представляющий собой электронную плату сантиметровой длины на механических ножках. Она была предварительно обработана составом, имитирующим запах насекомых, после чего запущена в гнездо тараканов, где изучала особенности их жизни «изнутри».

Робот, напоминающий жука, был спроектирован и в лаборатории Ок-Риджа (США). Он движется со скоростью полметра в минуту, оснащен набором датчиков и умеет, например, пролезать в запертые помещения под дверью.

Непростой задачей по праву считается организация группового поведения мини-роботов с ограниченными вычислительными ресур-

сами. Специалисты военного научного агентства США DARPA совместно с учеными университета Карнеги – Меллона в рамках проекта Millibot отрабатывают способы управления «малышами», каждый из которых умещается в десятках кубических сантиметров и при этом оборудован видеокамерой и датчиками движения. Изучают военные и всевозможные адаптивные подходы к организации движения: конечности-манипуляторы перенастраиваемых аппаратов снабжаются легко заменяемыми элементами, одни из которых (колесики или гусеницы) позволяют ездить по горизонтальной поверхности, другие (присоски) дают возможность лазать по стене и т.д.

Совместным взаимодействием десятков мобильных роботов, любой из которых уместится в кубическом сантиметре, занимается проект MiCRoN Европейской сети передовых исследований IST. «Малыши» умеют позиционироваться с точностью до 1 мкм и развивают скорость в несколько миллиметров в секунду. При этом каждый из них оснащен высококачественной CMOS-видеокамерой, устройством беспроводной связи и даже обладает навыками распознавания окружающего. В качестве источника энергии предполагается задействовать внешний сигнал. Роботы должны будут заниматься пространственной сборкой микромеханических элементов и высокоточной обработкой живых клеток под дистанционным управлением с центральной системы.

Специалисты Таганрогского государственного радиотехнического института разработали оригинальные алгоритмы управления большими коллективами роботов. С одной стороны, они оказались весьма простыми и несложными в компьютерной реализации, а с другой – проявили высокую эффективность в ходе моделирования. Когда перед группой роботов ставится определенная цель (например, догнать заданный объект), каждый из них самостоятельно определяет, сколько устройств уже отправилось на ее достижение, если таковых много, то он остается в ожидании новых приказов, а если еще мало (так бывает, когда цель задания расположена поблизости), начинает активно действовать.

Оригинальный шагающий робот NanoWalker создан в Массачусетском технологическом институте (США). Он представляет собой пьезокерамическую MEMS-треногу, которая передвигается с небольшой на первый взгляд скоростью 20 см/с, однако уникален сам принцип его передвижения. В секунду NanoWalker, способный

нести 240 г полезной нагрузки, совершает 4 тыс. микропрыжков по 50 мкм каждый. Бортовой вычислитель работает со скоростью 48 млн операций в секунду, обмениваясь с внешней управляющей системой по беспроводному каналу 4 Мбит/с и обеспечивая микро-сокращение ног под воздействием электричества – порядка 200 тыс. действий в секунду на атомарном уровне. NanoWalker умеет не только прыгать-бегать (т.е. все три ноги отрывать от поверхности), но и ходить. При ходьбе он за один шаг преодолевает 5 мкм.

Задача робота – выполнять позиционирование различных устройств с точностью до отдельных молекул или даже атомов. Он упростит выполнение тонких операций на клетках и задачи трехмерной микросборки, повысит эффективность электронных микроскопов и т.д. В будущем NanoWalker научится делать шаги длиной в доли нанометра. Теоретически, утверждают создатели, робот способен выполнять до 18 тыс. шагов в секунду. Правда, пока в зависимости от материала, из которого сделаны его ноги и по которому ему придется идти, а также от общей массы устройства каждый раз приходится существенно переделывать алгоритмы управления.

Сегодня развитые средства создания робототехнических систем доступны на рынке по вполне умеренным ценам. Что касается микроботов, то любой желающий может попробовать свои силы как в создании отдельных устройств, так и в автоматизации коллективного управления с помощью, например, линейки продуктов сеульской фирмы Microbot (www.microbotna.com), которая действует в этой нише с 1995 г. и сегодня предлагает множество решений для детей, взрослых, любителей, инженеров и программистов.

Ее колесные устройства длиной около 10–20 см умеют путешествовать по нарисованным линиям, объезжать препятствия, искать обратный или потерянный путь и находить выход из лабиринтов. Шагающие мини-роботы обследуют окружающее пространство с помощью механических усиков и движутся к цели в обход помех. Имеются в продаже шагающий робот-сова с подвижными крыльями, робот-червяк, многофункциональная микромышь, на которой удобно отрабатывать алгоритмы поиска, упомянутые выше роботы-футболисты, всевозможное вспомогательное и периферийное микрооборудование и т.п. Средства разработки входят практически во все комплекты, а бортовое ПО этих роботов доступно для изучения и модификации в исходных текстах.

6.3. Медицинские информационные системы

6.3.1. *Интеллектуальная медицинская оптико-телевизионная диагностическая система*

Уже давно назрел вопрос о необходимости массового использования в лечебных учреждениях России компьютерных диагностических систем, обеспечивающих оперативный анализ состояния внутренних органов человека (ухо, горло, гинекология, урология). Отечественные медицинские учреждения недостаточно обеспечены необходимым оборудованием, в том числе диагностическим. Зарубежные аналоги этой аппаратуры дороги и недоступны для большинства клиник России. Основная масса населения страны лишена возможности проходить лечение с использованием самых современных диагностических комплексов.

Кроме того, учащаются случаи врачебных ошибок, что отрицательно сказывается на пациентах и формирует соответственный имидж российской медицины. Учитывая актуальность указанных проблем, необходимо использование интеллектуальной медицинской телевизионной диагностической системы (ИНМТДС) для исследования внутренних органов человека. Развитие в России собственного производства диагностической аппаратуры нового поколения, несомненно, положительно скажется на проблеме обеспечения медицинских учреждений недорогим качественным оборудованием.

На основании анализа известных медицинских диагностических систем, известных методик диагностики, имеющихся медицинских инструментов сформированы основные требования к структуре и техническим характеристикам ИНМТДС. Определены ее необходимые функциональные элементы, включающие в себя устройство ввода изображения, видеокамеру, медицинский инструмент с устройством подсветки и источником питания, персональный компьютер, программное обеспечение, базы данных патологий органов человека. Обосновано применение методов технического зрения, проведена оценка их возможностей (на примере работы программ расчета текстурных, топологических и цветных характеристик органов человека) для проведения быстрого и качественного анализа исследуемых органов человека [14].

Оригинальность ИНМТДС заключается в алгоритмическом и программном обеспечении диагностических систем. Эффективность ИНМТДС определяется удобством и простотой в обращении, автоматизацией процесса диагностики.

Новизна ИНМТДС заключается в следующем:

– в совместном использовании специального световода (световолокна) в той части медицинского инструмента, которая непосредственно вводится в диагностируемый орган человека, а также миниатюрной цветной телевизионной камеры;

– в конструктивном расположении на медицинском инструменте специального световода, позволяющего эффективно использовать ИК и стерилизовать инструмент;

– в структурной реализации ИК, позволяющей комплектовать медицинскую систему на стационарном персональном компьютере или на ноутбуке, включаемых в информационную сеть клиники; ИК на ноутбуке можно использовать для оперативной диагностики и лечения человека;

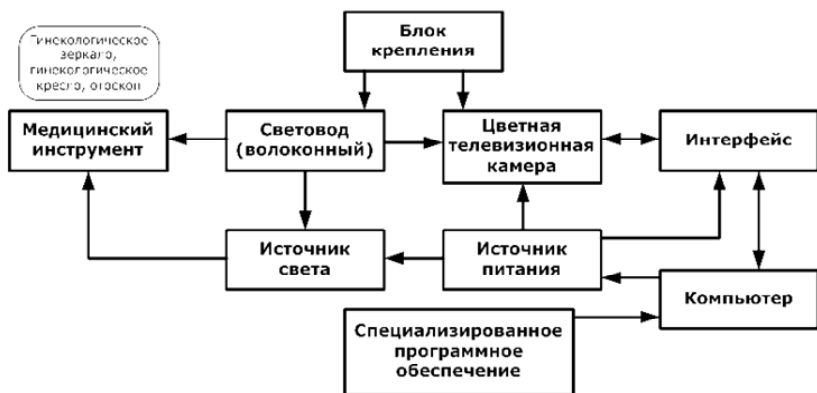


Рис. 6.3. Структурная схема ИНМТДС

– в базе данных, обеспечивающей неискаженную запись и хранение цветных телевизионных изображений патологий органов человека;

– в специализированном диагностическом программном обеспечении на основе расчёта текстурных характеристик поверхности исследуемого объекта, позволяющем в автоматизированном режиме, реальном времени и с высокой вероятностью ставить диагноз заболевания человека.

Структура ИНМТДС представлена на рис. 6.3.

В ИНМТДС используются следующие информативные признаки изображения внутренних органов:

- цвет (оттенки);
- линейные размеры (длина, ширина);
- геометрическое положение;
- геометрические характеристики (площадь, периметр).

Процесс работы ПО состоит из двух этапов. Сначала изображение, полученное с видеокамеры ИНМТДС, оцифровывается и поступает в компьютер. Затем начинается этап его дальнейшей математической обработки.

Поверхность исследуемых органов человека покрыта слоем слизи, который отражает свет, поступающий от источника освещения, и вызывает появление бликов на изображении, получаемом с помощью малогабаритной видеокамеры. Поскольку основную информацию о состоянии органа, которую анализирует программа, несет цвет, блики на изображении необходимо исключить из обработки.



Рис. 6.4. Профиль строки синей компоненты изображения, содержащего блик. Пик яркости, соответствующий блику, отмечен стрелкой

Видеокамера, с помощью которой формируется изображение органа, считывает изображение в цветовой модели RGB (Red-Green-Blue – красный-зеленый-синий), которое затем оцифровывается в формате 24 бита на пиксель и поступает в компьютер. Пиксели, соответствующие блику, имеют значение интенсивности, близкое к 255. Практически на исследованных автором изображениях блик можно было обнаружить по значению одной из RGB компонент больше 210. На некоторых бликах это значение соответствовало самой яркой точке блика, остальные точки были менее яркими. На рис. 6.4 изображен профиль строки синей компоненты изображения рис. 6.5, содержащий блик.

Методика исключения бликов из обработки выглядит следующим образом:

Шаг 1. Для каждого блика на изображении определить координаты по крайней мере одного пикселя. Это можно сделать, сравнив значения интенсивности компонент изображения с пороговым значением. Все найденные точки занести в список.

Шаг 2. Для каждой точки, найденной на предыдущем шаге, определить границы блика, к которому она относится, и пометить все точки с внутренней стороны границы как точки, занятые бликом. Этого можно добиться, если из каждой точки двигаться в радиальных направлениях и следить за тем, как изменяется модуль производной яркости изображения по направлению движения. Точка, в которой модуль производной начнет уменьшаться, и является границей блика. На графике, изображенном на рис. 6.4, видно, что это условие выполняется для точек с координатами 545 и 565.

Программная реализация алгоритма поиска границ бликов напоминает известный алгоритм поиска в ширину:

Шаг 1. Сначала формируется первоначальный набор «активных» точек, принадлежащих блику (см. описание шага 1 выше). Для каждой точки сохраняется последний раз вычисленная разница в интенсивности соседних точек последовательности (сначала эта разница принимается равной нулю).

Шаг 2. На основе первоначального набора точек определяется набор «активных» точек следующего поколения. Ими выбираются точки, соседние для точек предыдущего поколения, удовлетворяющие критерию: $(p - p_{i-1}) \geq (p_{i-1} - p_{i-2})$, где p_i – интенсивность i -й точки в последовательности.

Шаг 3. Процесс повторяется с шага 2 и останавливается естественным образом, когда набор точек следующего поколения на очередной итерации оказывается пустым.

Все пиксели, принадлежащие какому-либо из предыдущих поколений точек, относятся к бликам.

Участок графика профиля строки изображения, соответствующий области блика, показан на рисунке стрелкой. Граница области блика соответствует моменту резкого изменения наклона касательной к графику в сторону уменьшения модуля производной.

В программе информация о яркости пикселей, используемая для поиска границ бликов, формируется в результате фильтрации первоначального RGB изображения (для устранения высокочастотных шумов) и последующего перевода изображения в цветовую модель La^*b^* . Это цветовая модель, стандартизированная Commission Internationale de l'Eclairage – Международной комиссией по освещению (МКО), канал L изображения в этой цветовой модели хранит яркость точки, канал a^* – цветовой оттенок от темно-зеленого через серый к розовому, b^* – светло-синий, серый, ярко-желтый.

Фильтрация осуществляется сверткой каждого из R , G , B каналов изображения по отдельности с ядром в виде матрицы $N \times N$, значение элемента которой можно вычислить по следующим формулам:

$$a_{ij}^R = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}},$$

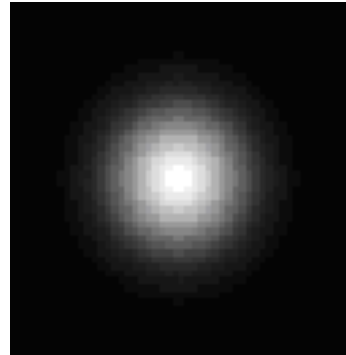
$$a_{ij}^G = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}},$$

$$a_{ij}^B = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}}.$$

Ядро фильтра представляет собой гауссиан с параметром σ . Размер матрицы и значение параметра, используемые в программе, подобраны опытным путем. Размер матрицы 7×7 , $\sigma = 1$.

На сегодняшний день цветовая модель МКО La^*b^* является почти универсальным и самым распространенным цветовым пространством. В программе модель используется и по другой причине: отличия координат пространства La^*b^* позволяют определить, насколько разными два цвета будут казаться человеку. Кроме того, в этой цветовой модели цветовой оттенок отделён от яркости, что является важным в условиях недостаточно равномерной освещенности объекта исследования.

Рис. 6.5. Изображение ядра фильтра для сглаживания высокочастотных шумов



Для того чтобы получить координаты пикселя в цветовом пространстве La^*b^* , программа преобразует его цвет сначала в цветовое пространство МКО XYZ (другая цветовая модель, стандартизированная МКО, используемая, в основном, как промежуточная цветовая модель для перевода цветов из одной цветовой модели в другую), затем в МКО La^*b^* .

Преобразование $RGB \rightarrow XYZ$ осуществляется следующим образом:

R, G, B – числовые значения цветовых компонент пикселя, полученные после оцифровки и фильтрации и лежащие в диапазоне

$$r = (R/255)/12,92, \text{ если } (R/255) < 0,03928, \text{ иначе}$$

$$r = (((R/255)+0,055)/1,055)2,4;$$

$$g = (G/255)/12,92, \text{ если } (G/255) < 0,03927, \text{ иначе}$$

$$g = (((G/255)+0,055)/1,055)2,4;$$

$b = (B/255)/12,92$, если $(B/255) < 0,03928$, иначе

$b = (((B/255)+0,055)/1,055)2,4$;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Преобразование $XYZ \rightarrow La^*b^*$ осуществляется следующим образом:

$x = (X/X_n)^{1/3}$, если $(X/X_n) > 0,008856$, иначе $x = 7,787*(X/X_n) + 16/116$;

$y = (Y/Y_n)$, если $(Y/Y_n) > 0,008856$, иначе $y = 7,787*(Y/Y_n) + 16/116$;

$z = (Z/Z_n)$, если $(Z/Z_n) > 0,008856$, иначе $z = 7,787*(Z/Z_n) + 16/116$;

$L = 116*y - 16$; $a^* = 500*(x - y)$; $b^* = 200*(y - z)$, где $X_n = 0,95047$, $Y_n = 1,0$, $Z_n = 1,08883$, что соответствует стандартному наблюдателю 2° и фоновому освещению Illuminant D65 (дневной свет).

На рис. 6.6 показаны спектры цветовых оттенков изображений здорового и больного органа пациента. Яркость точки характеризует частоту встречаемости соответствующего оттенка. Видно, что спектры значительно отличаются по диапазону.

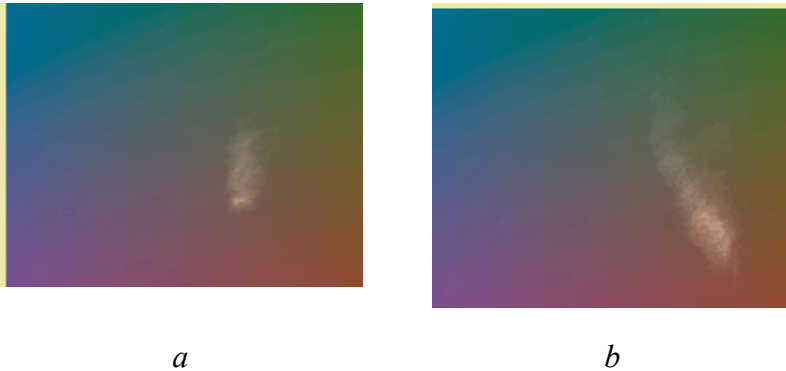


Рис. 6.6. Частота цветовых оттенков (La^*b^*) изображения здорового органа (шейки матки) – *a*; имеющего отклонения – *b*

Проанализировав частоту различных цветовых оттенков на изображениях здоровых органов и органов, имеющих различные отклонения, можно увидеть, что они значительно отличаются.

На основании проведенного анализа нескольких изображений внутренних органов здоровых пациентов, полученных с помощью МОТДС, была выделена область спектра, в которую укладываются спектры этих изображений здоровых органов. Программа вычисляет отношение точек конкретного изображения, цветовые оттенки которых попадают в эту область, к общему числу точек и использует полученную величину как меру соответствия спектра изображения спектру, характерному для изображения здорового органа. Полученная величина может быть использована в целях медицинской диагностики.

Варианты ИНМТДС для гинекологических исследований представлены на рис. 6.7 и 6.8 [14].

*a**b*

Рис. 6.7. Варианты ИНМТДС для гинекологических исследований:
a – гибкий манипулятор; *b* – трехзвенный манипулятор

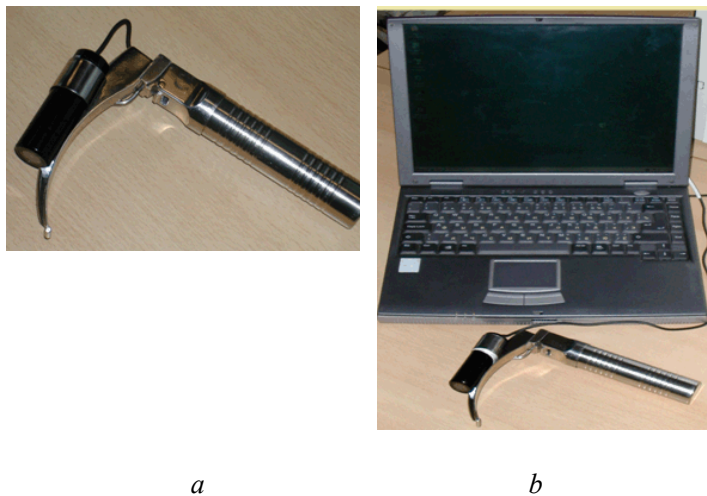


Рис. 6.8. ИНМТДС для исследования ЛОР заболеваний:
a – общий вид; *b* – мобильный вариант

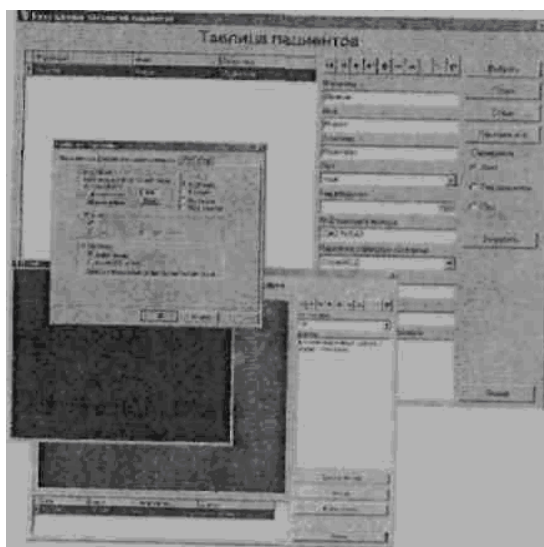


Рис. 6.9. Внешний вид программы «Диагностика»

Внешний вид программы для ИНМТДС «Диагностика», реализующей захват, обработку, неискажённое хранение изображений и данных, а также постановку диагноза заболеваний, представлен на рис. 6.9.

6.3.2. Интеллектуальная мехатронная система контроля внутривенной процедуры инфузии

В данном разделе описывается интеллектуальная мехатронная система контроля внутривенной инфузии.

После анализа существующих подходов и методов к разработке и созданию медицинских инфузионных систем, а также устройств, уже присутствующих на рынке медицинской техники была разработана мехатронная система контроля внутривенной инфузии жидких лекарственных средств, выполняющая следующие функции:

1. Контроль физиологических параметров пациента во время проведения процедуры внутривенной инфузии.

2. Контроль номенклатуры вводимого жидкого лекарственного средства (ЖЛС).

3. Контроль скорости введения ЖЛС в организм пациента.

4. Контроль объема вводимого ЖЛС в организм пациента.

5. Сигнализация медицинскому персоналу о возникновении непредвиденной ситуации в ходе проведения процедуры внутривенной инфузии:

а) выпадение иглы из вены пациента;

б) увеличение/уменьшение скорости введения лекарственного средства в организм пациента;

в) резкое ухудшение состояния пациента во время проведения процедуры внутривенной инфузии;

г) превышение либо уменьшение объема вводимого лекарственного средства во время проведения процедуры внутривенной инфузии.

6. Прекращение процедуры внутривенной инфузии жидких питательных средств либо питательных растворов в организм пациента.

Данная система не имеет прямых аналогов ни на российском, ни на мировом рынках медицинской техники. Разработанная система включает:

- 1) автономный электронный модуль (АЭМ);
- 2) считыватель штрих-кода (СШК);
- 3) датчик пульса (ДП);
- 4) два выносных модуля ВМ-1 и ВМ-2;
- 5) пульт сбора информации ПСИ (пульт дежурной медсестры);
- 6) носимый пейджер дежурной медсестры НП;
- 7) персональный компьютер ПК (опционально).

Структурная схема разработанной системы изображена на рис. 6.10.

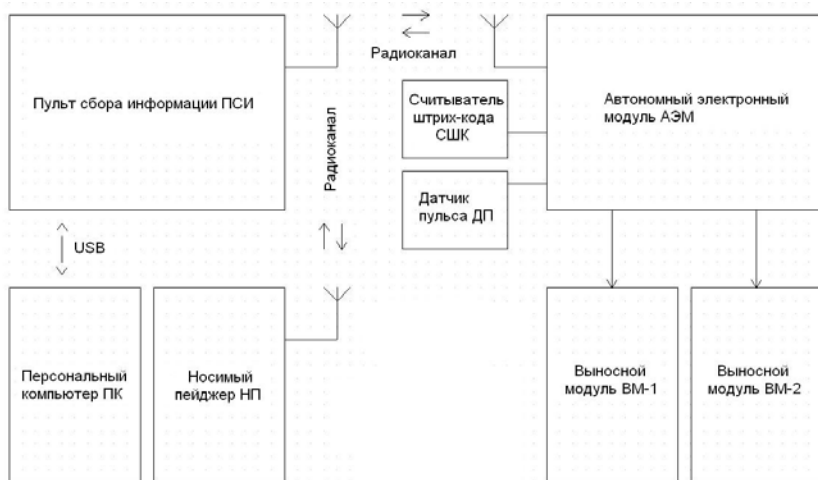


Рис. 6.10. Структурная схема системы контроля состояния капельниц

Исходя из приведенной на рис. 6.10 структурной схемы мехатронной системы внутривенной инфузии жидких лекарственных средств, опишем её принцип работы. Младший медицинский персонал встраивает стандартный инфузионный тракт (который используется во всех медицинских учреждениях для проведения процедуры внутривенной инфузии, а следовательно, не является специализированным расходным материалом для инфузионной системы), фиксирует иглу тракта на вене пациента и приступает к работе с системой.

Для начала работы необходимо посредством считывателя считать штрих-код лекарственного препарата, назначенного пациенту его лечащим врачом. Это необходимо для того, чтобы исключить возможность введения лекарственного средства, могущего повредить здоровью пациента. Затем при помощи автономного электронного модуля (АЭМ) медсестра задает время, необходимое для проведения процедуры внутривенной инфузии, и объем вводимого лекарственного средства. Сигнал с АЭМ передается на выносной модуль, при помощи которого осуществляется контроль скорости подачи вводимого жидкого лекарственного средства, и на флуктуационный датчик, при помощи которого происходит подсчет объема вводимого в организм пациента лекарственного вещества.

В соответствии с выставленными медицинским персоналом параметрами происходит старт процедуры внутривенной инфузии. Во время её проведения АЭМ постоянно опрашивает выносной модуль и емкостный флуктуационный датчик с целью выявления нештатных ситуаций при проведении процедуры внутривенной инфузии. Сигналы с нескольких АЭМ поступают на пульт сбора информации (ПСИ), располагающийся на медсестринском посту медицинского учреждения. ПСИ отображают информацию о ходе течения сразу нескольких процедур внутривенной инфузии (до 60) и осуществляют оперативное предупреждение медицинского персонала о возникновении нештатных ситуаций с указанием неисправной системы.

Кроме этого, у дежурной медсестры при себе все время находится носимый пейджер (НП), который, в случае возникновения нештатной ситуации, сигнализирует о том, что необходимо срочно вернуться на медсестринский пост для того, чтобы локализовать неисправность и предпринять меры для её устранения. На рис. 6.11–6.16 представлены фотографии макетного образца механической системы контроля процедуры инфузии, а также её отдельных модулей.

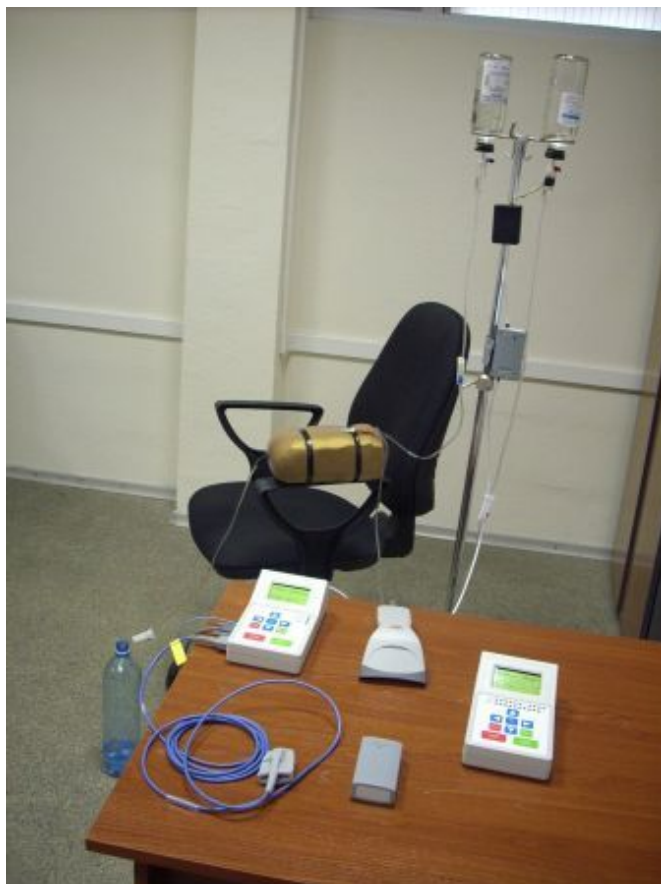


Рис. 6.11. Макетный образец интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии



Рис. 6.12. Выносной модуль интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии



Рис. 6.13. АЭМ интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии



Рис. 6.14. ПСИ интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии



Рис. 6.15. НП интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии



Рис. 6.16. Емкостной флуктуационный датчик интеллектуальной мехатронной системы контроля процедуры инфузии

6.3.3. Информационные системы медицинских микророботов

Оперативное хирургическое вмешательство является до настоящего времени одним из наиболее сложных видов медицинской деятельности. В ряде случаев хирург, работая вручную с помощью инструмента, оказывается на пределе своих психофизиологических

возможностей по точности совершения рабочих движений, по тонкости ощущений и быстроте реакций. К этому надо добавить большую физическую нагрузку, так как нередко операции продолжаются по несколько часов. Обычно хирург работает стоя, наклонясь над больным, т.е. в наименее рациональной с точки зрения эргономики позе. Отсутствие адекватной обратной связи, ограниченные условия наблюдения, работа по интуиции являются источником повышенного эмоционального напряжения. Вместе с тем очевидно, что человек, использующий свой жизненный опыт и интуицию, не может быть исключен из хирургического процесса и заменен автоматическими устройствами.

Для того чтобы существенно улучшить условия работы хирурга и при этом повысить эффективность и качество выполняемых им операций, необходимо принципиально изменить технику хирургических операций с использованием средств мехатроники и робототехники. Процесс выполнения хирургической операции в ряде случаев может быть организован таким образом, чтобы основную работу по реализации оперативного вмешательства выполняли робототехнические системы, а функции хирурга сводились к управлению этими системами. Таких примеров сегодня уже немало. Робототехника нашла применение при выполнении малоинвазивных операций в тех случаях, когда оперативное вмешательство осуществляется в малых объемах операционной зоны и требует высокой точности. Например, в микрохирургии глаза существует операция (*radialkeratotomy*), при которой глубина надреза оболочки глаза не должна превышать 20 мкм, в то время как даже опытный хирург может превысить 100 мкм. В Канаде для выполнения этой операции разработан специальный робототехнический комплекс, обеспечивающий нужную точность. Другой областью, где также требуется высокая точность, является микронейрохирургия. Робот для микрохирургии мозга разработан в Великобритании. В США запатентована роботизированная система для выполнения ортопедических операций, при которых необходимо точное позиционирование инструмента относительно сустава.

Во всех перечисленных случаях операцию выполняет робототехническая система, функционирующая под управлением хирурга-оператора, который принимает участие в операции, хотя изменяются как методика оперативного вмешательства, так и функции хирурга.

В связи с этим вопросы эргономического обоснования при проектировании таких систем сохраняются. Если их не принимать во внимание, то и при использовании робототехнической системы, несмотря на частичную автоматизацию работы хирурга, сохраняется проблема «человеческого фактора», в том числе повышенного риска именно из-за участия человека в выполнении операции.

Сама проблема проектирования медицинских робототехнических систем может быть рассмотрена с позиции повышения комфортности работы хирурга без потери и, как правило, с существенным выигрышем в безопасности и качестве выполнения операции. Эту проблему мы рассмотрим более подробно на примере разработки робототехнической системы для выполнения диагностических и хирургических операций внутри кровеносных сосудов.

Состав мини-робота для диагностики и хирургии сосудов

Диагностика и хирургия кровеносных сосудов, пораженных патологическим процессом, является одной из наиболее часто применяемых медицинских технологий. Задача состоит в исследовании внутренней поверхности магистральных артерий человека (зон поражения, проявляемых в сужении) и последующего их устранения хирургическим путем. Для решения этой проблемы применяют методы, основанные на использовании различных физических эффектов. При этом рабочий инструмент непосредственно вводится хирургом в пораженный участок сосуда через надрез.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия) разработан мини-робот, предназначенный для автономного передвижения внутри крупных кровеносных сосудов, который способен самостоятельно доставить рабочий или диагностический инструмент к пораженному участку, перемещаясь внутри сосуда. Мини-робот представляет собой трехзвенное устройство, оснащенное диагностическими и воздействующими элементами. Движение мини-робота происходит за счет попеременного сокращения и фиксации звеньев на стенках сосуда (т.е. с использованием перистальтического типа перемещения). Его трехкамерный движитель является гидравлическим (в качестве рабочей жидкости используется физиологический раствор).

Конструкция робототехнической системы позволяет мини-роботу перемещаться внутри сосуда, принимая его форму и при этом не препятствуя току крови.

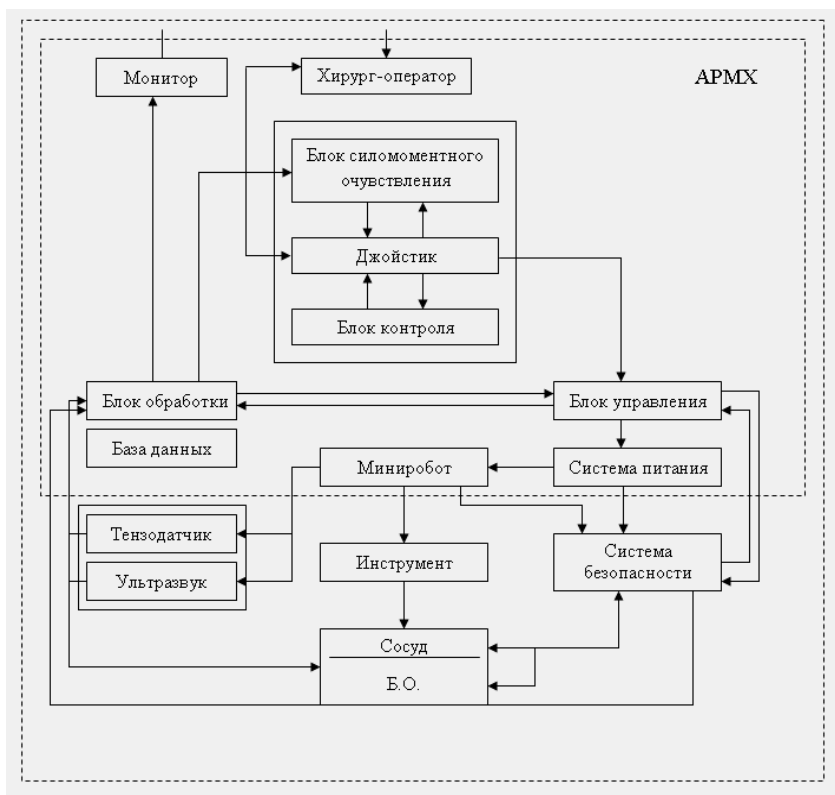


Рис. 6.17. Структурно-функциональная схема мини-робототехнической системы

Структурно-функциональная схема робототехнической системы, включающей описываемый мини-робот, приведена на рис. 6.17. Управление мини-роботом осуществляется хирургом-оператором с автоматизированного рабочего места хирурга (АРМХ). АРМХ представляет собой специализированный кабинет, оборудованный системой безопасности, средствами обработки информации – ПЭВМ,

содержащей необходимую базу данных, системой визуализации (монитором), пультом ручного управления с блоком контроля, а также блоками управления и питания. Согласно принятой классификации АРМХ можно квалифицировать по техническому исполнению как изолированную автоматизированную многокомпонентную систему, а по степени перемещения хирурга – как автоматизированное рабочее место с ограничением.

Внутрисосудистая операция проводится под управлением хирурга-оператора с помощью пульта ручного управления мини-роботом. Пульт ручного управления спроектирован с наличием обратной связи по силе и моменту (блок силомоментного очувствления) и включает в себя также многостепенной джойстик и блок контроля. Нажатием на джойстик хирург-оператор передает управляющий сигнал на гидроприводную систему, приводящую в движение мини-робот. Подача физиологического раствора в звенья осуществляется через катетер, присоединенный к гидроприводной системе.

Мини-робот имеет собственные температурные и силовые сенсоры, что создает предпосылки для облегчения работы хирурга. Силомоментное очувствление необходимо для получения тактильной информации о сопротивлении движению мини-робота по руслу артерии. Информация, поступающая от сенсоров робота, преобразуется в усилие на кисть хирурга через активную рукоятку (джойстик), что особенно важно при возникновении препятствия (тромба, атеросклеротической бляшки). Реализация отображения сил может быть выполнена одним из способов, широко применяющихся в робототехнике (систем двустороннего действия). Данные о состоянии русла сосуда поступают в блок обработки от тензодатчиков, установленных на мини-роботе, а также с ультразвукового микродатчика.

Блок обработки сигналов формирует также визуальное изображение внутренности сосуда на экране монитора. Наличие тактильной и визуальной информации позволяет хирургу-оператору принять решение о дальнейшем продвижении робота или о выполнении им необходимых для данного типа операции действий. Все данные, поступающие в блок обработки информации, записываются в базу данных. Система безопасности следит за общим состоянием пациента, а также обеспечивает непрерывный контроль работы мини-робота в канале сосуда, выдавая визуальную информацию на монитор для хирурга-оператора. В случае возникновения экстренной си-

туации система безопасности автоматически отключает систему питания мини-робота.

6.3.3.1. Деятельность хирурга – оператора мини-робота

Для того чтобы сформулировать эргономические требования к рассматриваемой робототехнической системе, необходимо вначале определить, какие задачи и каким образом решает с помощью мини-робота хирург-оператор. Во-первых, он должен иметь возможность получить на экране всю необходимую информацию об исследуемом участке кровеносной системы пациента. Эта информация может быть получена предварительно с использованием УЗ-диагностики или ангиографии и храниться в соответствующей базе данных. Отметим, что хирургу должна быть доступна вообще вся информация о пациенте, так как в процессе операции могут понадобиться и другие данные. Целесообразно использовать средства машинной графики для отображения состояния кровеносной системы, так как они наиболее легко воспринимаются оператором. Хирург должен видеть, по крайней мере, два графических образа. Один из них – это пространственная «карта» сосудов пациента с фиксацией точки, где находится робот. Второй – это изображение, снимаемое видеокамерой, установленной в информационной системе мини-робота, т.е. вид внутреннего состояния сосуда пациента.

Целесообразно иметь возможность предварительного моделирования в реальном времени будущей операции с учетом таких реальных факторов, как артериальное давление, скорость потока крови, предполагаемое состояние пораженного участка и т.д. Располагая математической моделью робота, хирург может предварительно «пройти» оперируемый сосуд, выяснить критические моменты, которые могут возникнуть при операции, и найти способы их преодоления.

Хирург, прежде чем приступать к операции, должен убедиться, что робот функционирует нормально и он в состоянии им управлять. Для этого целесообразно разместить робот в специальном трубопроводе соответствующего диаметра, в котором поддерживается поток жидкости, имитирующий ток крови. Подобное устройство можно использовать и при отработке навыков оператора по управлению

мини--роботом. Естественно, отработку навыков управления нужно проводить заблаговременно.

Далее робот вводится в артерию через прокол, и хирург приступает к непосредственной операции. Первая ее стадия состоит в том, чтобы подвести робот к патологическому очагу, не нарушая нормальной жизнедеятельности организма. Для этого вся необходимая функциональная информация о состоянии пациента должна постоянно присутствовать в поле зрения оператора. На этой стадии хирург использует информацию на дисплее о положении робота в кровеносной системе пациента. После того как робот достиг нужного участка, должна быть включена оптическая система робота, дающая информацию о внутреннем состоянии сосуда. Эта информация может быть получена не обязательно оптическим путем, а, например, с использованием ультразвуковых датчиков и затем преобразована в изображение на экране дисплея. Получив эту информацию, хирург должен решить вопрос о том, целесообразна ли операция и каким образом ее можно выполнить. Если принято решение о начале операции, то хирург приводит в действие рабочий инструмент. Это наиболее ответственная часть операции; для того чтобы исключить на этой стадии возможные ошибки оператора, ее целесообразно проводить в автоматическом режиме под контролем хирурга. Регулирование таких параметров, как скорость движения робота, частота вибраций инструмента, температура в рабочей зоне, наконец, выбор текущей конфигурации робота, должны осуществляться с помощью определенных алгоритмов по показаниям датчиков текущей информации. Тем не менее всегда в ходе выполнения хирургической операции могут возникнуть ситуации, требующие участия хирурга, поэтому режим ручного управления мини-роботом на этой стадии также должен быть предусмотрен. Здесь особо важную роль играет наличие системы отображения усилий, придающей естественность рабочим движениям хирурга и вместе с тем позволяющей регулировать вручную работу инструмента. При этом джойстик может выполнять роль силового дисплея, формируя дополнительное усилие сопротивления движению оператора всякий раз при возникновении опасной ситуации, например при избыточной температуре, создаваемой за счет работы ультразвукового инструмента. Обратим внимание и на тот факт, что время сенсомоторной реакции по механорецепторному каналу на порядок меньше, чем время соответствующей

шей реакции по зрительному каналу, что немаловажно с позиций безопасности для пациента. С другой стороны, этот режим наиболее сложен для хирурга-оператора мини-робота, поскольку он может оказаться на границе своих информационных возможностей (пропускной способности), воспринимая одновременно информацию по зрительному каналу (возможно, двух видов – графическую и символьную) и по механорецепторному каналу. Этот вопрос требует тщательного анализа в каждом конкретном случае.

После завершения стадии разрушения окклюзии (нарушение проходимости некоторых полых образований в организме (кровеносных и лимфатических сосудов)) наступает последний этап операции – извлечение мини-робота вместе с удаленным материалом. Робот во всех случаях вводится на тонком и прочном катетере и в сложенном виде может быть механически извлечен из канала сосуда. Однако в некоторых случаях – при поворотах, сужениях и т.п., вытягивая катетер, можно повредить стенки сосуда корпусом мини-робота. Поэтому в критических точках робот должен закрепляться внутри сосуда и самостоятельно проходить сложные участки. Задача хирурга состоит в том, чтобы, используя свой опыт, определить эти сложные для прохождения участки сосуда и своевременно передать управление автоматике, сохраняя контроль над движением мини-робота.

Обобщая сказанное, можно определить основные задачи хирурга-оператора медицинского мини-робота. К ним относятся ввод и редактирование исходных данных, формирование команд на запуск автоматической системы с принятием решения о передаче управления хирургу в нестандартных или неопределенных ситуациях. Важным является и прогнозирование обстановки при ее изменении и недостаточности информации. Хирург-оператор выбирает текущие цели функционирования системы в зависимости от обстановки и осуществляет выбор способов управления подсистемами РТС. В автоматических режимах работы оператор контролирует ход операционного процесса и оценивает результаты работы системы. Для решения последней задачи рабочие движения мини-робота могут быть дополнены гностическими движениями, т.е. специальными движениями, используемыми для диагностики состояния рабочей среды с помощью имеющихся «на борту» информационных датчиков. Хирург-оператор принимает решение о переходе на ручное управление

в случае выхода контролируемых параметров за допустимые пределы и осуществляет такое управление. Он может выбирать каналы и технические средства передачи информации в зависимости от текущей обстановки. Еще одной задачей оператора является выделение значимой информации и ее классификация по приоритету с определением видов программ автоматической проверки системы. При этом возможна выборочная проверка состояния и функционирования узлов системы при отсутствии информации о неисправном узле по автоматическим каналам контроля.

6.3.3.2. Эргономические требования к хирургическому мини-роботу

Работа хирурга-оператора медицинского мини-робота представляет собой сложную форму предметной деятельности человека, опосредованной технической системой. Поэтому прежде всего при эргономическом проектировании мини-робота нужно разделить требования к внутренним и внешним средствам деятельности человека. К первым относятся знания, умения и навыки оператора, которые должны несколько отличаться от своих аналогов при выполнении операций по традиционной методике – вручную с помощью хирургических инструментов. Ко вторым относится собственно робототехническая система, которая должна быть согласована с психофизиологическими возможностями оператора.

Эргономические требования к мини-роботам, в свою очередь, можно разделить на группы – требования к системе представления информации оператору, к органам управления и требования к системе управления роботом, обеспечивающие эффективное управление со стороны оператора.

Особенностью медицинского мини-робота является тот факт, что рабочей средой робота является организм пациента. Это накладывает чрезвычайно жесткие требования, предъявляемые к мини-роботу с позиции безопасности пациента. Эти требования уже нельзя назвать эргономическими в обычном смысле этого слова, но необходимо иметь в виду при проектировании системы. К требованиям общей безопасности системы относятся преимущественно требования технического характера: стабильное давление питания, возможность определения местоположения микроробота с помощью внешних диагно-

стических устройств. Следует отметить необходимость многократной стерилизации оборудования и контроля за общим состоянием пациента (пульс, кровяное давление, температура). К значимым требованиям можно отнести также возможность экстренного удаления микроробота из русла артерии, недопустимость термодеструкции и повреждения стенки сосуда (интимы) при проведении диагностических и хирургических процедур. Важным является и плавный режим движения микроробота при его локализации в русле артерии с возможностью ручного управления.

В большей мере к эргономическим относятся требования к рабочей среде, в которой находится хирург-оператор, включая освещенность, температуру, дизайнерские решения, связанные с эргономическим оформлением рабочего места оператора. К этой же группе требований можно отнести оптимальное антропометрическое положение элементов системы и самого оператора, условия для поддержания оптимальной рабочей позы, определение ее характеристик. Необходимо определить объем и эффективность рабочих движений, максимальный допустимый темп движения, точность управляющих движений руки и пальцев хирурга, оптимальные и допустимые углы обзора.

Из проведенного выше анализа деятельности оператора мини-робота можно извлечь некоторые эргономические принципы организации его деятельности. Прежде всего, это принцип единства деятельности, который состоит в том, что работа оператора и активной технической системы представляет собой единый процесс деятельности эргатической робототехнической системы (ЭРТС). Для того чтобы определить функции человека и функции робототехнической системы, причем оптимальным образом разделить их в соответствии с возможностями оператора и мини-робота, нужно вначале описать саму деятельность. Под этим понимается как описание «технологии» выполнения операции на всех ее стадиях, т.е. соответствующих движений мини-робота и рабочего инструмента, так и необходимой для этого информации. Только после этого можно будет обоснованно определить, что должен делать робот в автоматическом режиме, когда управление должен брать на себя хирург-оператор, наконец, какие возможны формы взаимодействия между ними. Если деятельность ЭРТС в целом описана, то те функции, которые не в состоянии выполнить оператор, должны выполняться мини-роботом, и наоборот.

Деятельность хирурга, использующего мини-робот, особенно на оперативной стадии, должна быть максимально приближена по своей структуре и рецепции к работе хирурга по обычной методике (принцип переноса навыков). Это связано, во-первых, с тем, что к операциям описываемого типа должны допускаться только хирурги, имеющие опыт сосудистой хирургии и, следовательно, уже обладающие навыками проведения таких операций, которые необходимо использовать и при работе с мини-роботом. Во-вторых, мини-робот можно использовать в составе специализированного тренажерного комплекса для отработки техники внутрисосудистых операций. Целесообразно, чтобы полученные при работе с таким тренажером навыки были пригодны и при выполнении соответствующих операций по традиционной методике. Отметим, что наличие робототехнического тренажера необходимо для решения задач подбора и обучения персонала как при работе хирурга-оператора, так и при групповой работе «хирург-оператор – ассистент-оператор».

Следствием принципа переноса навыков является и необходимость использования системы силомоментного (или тактильного) оучувствления, о чем уже говорилось выше. При этом конструкция специализированной рукоятки управления роботом должна быть близка по конфигурации и по расположению относительно руки хирурга к рукоятке рабочего инструмента при выполнении операции «вручную». Эти же принципы должны быть приняты во внимание и при разработке упомянутого тренажерного комплекса на базе разрабатываемой РТС.

Еще один эргономический принцип может быть назван принципом адекватности отображения информации оператору РТС. Дело в том, что оператор не видит, как выполняется операция, и может судить об этом только косвенно по предоставляемой ему информации. Эта информация имеет характер графического изображения на экране монитора, вид которого зависит от стадии выполняемой операции, а также представляется в форме, воспринимаемой механорецепторами руки (кисти и пальцев) хирурга-оператора. Эта информация опосредована системой измерения и обработки информации и принципиально не может быть полной. Проблема состоит в том, чтобы определить комплексный информационный образ таким образом, чтобы этого было достаточно для формирования в сознании хирурга концептуальной модели происходящего процесса и, что

наиболее важно, чтобы эта модель была, в основном, адекватна реальному процессу, происходящему на операционном поле.

Поскольку пропускная способность оператора ограничена, а количество информации, которое он должен воспринимать в единицу времени, достаточно велико, необходимо использовать особые способы кодирования для информации об опасных, критических ситуациях. К ним может быть отнесено звуковое кодирование сигналов или использование речи, цветовая модуляция визуальных сигналов, появление мигающих символов и т.д.

В медицинских робототехнических системах следует учитывать, что хирург-оператор – не технический специалист, что налагает определенные особенности на способы представления информации. Очевидно, что при управлении мини-роботом в данном случае не могут быть использованы так называемые роботоориентированные языки, представляющие сложность для хирурга. Необходима разработка специального проблемно-ориентированного языка хирурга-оператора. Такой язык должен быть близок к естественному и использовать медицинские термины, к которым прибегает хирург в своей практике при описании хода операции, ситуации на операционном поле, при общении с ассистентом и т.п. Создание такого языка, в свою очередь, потребует разработки баз знаний, используемых при внутрисосудистых операциях. Отметим, что сегодня накоплен уже достаточно большой опыт по созданию баз знаний в близких областях медицины.

6.3.3.3. Информационные системы медицинских нанороботов

В Монреальском университете впервые в истории создан медицинский робот, способный путешествовать по кровеносным сосудам живых существ. Собранный при помощи нанотехнологий ферромагнитная сфера диаметром 1,5 мм двигалась по артерии подопытной свиньи со скоростью 10 см в секунду. Ее движения направлялись дистанционно при помощи специальной компьютерной программы. Планируется создание нанороботов еще меньших размеров, которые смогут путешествовать внутри человеческих органов, осуществляя микрохирургические операции немыслимой сложности и борясь с болезнями, которые в настоящее время считаются неизлечимыми.

Применение нанотехнологий в медицине находится на начальной стадии: в клиниках это пока мало применяется, речь скорее идет о лабораторных экспериментах, но есть и уже применяемые в медицинской практике наноустройства – в частности, специальные капсулы, принимаемые перорально, как обычное лекарство: их оболочка усеяна микроскопическими отверстиями, позволяющими свободно поступать внутрь молекулам кислорода и глюкозы и в то же время задерживающими более крупные объекты – антитела организма. Внутри капсулы могут находиться, скажем, клетки, вырабатывающие инсулин: больной диабетом человек, в организме которого содержатся такие клетки, надежно защищенные от разрушительного воздействия антител, может восполнять недостаток этого гормона без помощи инъекций.

Оказывается, наноматериалы способны играть роль своеобразного сита, отсеивая вирусы и бактерии по столь банальному признаку, как их размер. При помощи крошечных отверстий, которыми покрыты наномембраны, клетку можно защитить от вирусов и даже крупных молекул, попадания которых в организм мы хотим избежать. Наночастицы имеют несколько разных типов. Существуют органические наночастицы – липосомы, способные встраиваться в клетки, придавая им определенные свойства. Металлическими наночастицами можно усеять раковую клетку, а затем разрушить ее, нагревая микрочастицы металла. Более сложные устройства обладают рядом качеств, которые можно запрограммировать заранее. В устройствах, подобных канадскому нанороботу, но имеющих еще меньший размер, можно разместить крошечную видеокамеру и превратить их в оптический зонд, путешествующий по кровеносным сосудам организма. В настоящее время существуют наносенсоры, способные заметить попадание в организм определенных молекул.

Путешествуя по мельчайшим сосудам нашего организма, нанозонды способны сообщить врачу самые точные данные о состоянии нашего здоровья. Возможности диагностики, предоставляемые наноустройствами, поистине обширны. Наноустройства могут ощущать кровеносные сосуды практически тактильным путем, определяя сопротивление ткани воздействию. Но программы обработки их данных вполне способны визуализировать информацию, показав оператору за компьютером, как выглядит та или иная клетка или мельчайший кровеносный сосуд.

Одно из главных направлений, которым занимаются ученые, – создание биосовместимых материалов, не отторгаемых клетками человеческого организма, или, напротив, материалов, не позволяющих поселиться на них бактериям. Первые могут применяться в качестве имплантатов (некоторые из них уже используются в стоматологических клиниках для особенно сложных случаев протезирования). Вторые – для создания медицинских инструментов, упаковки и т.п. У любой ткани есть собственный рельеф и собственная химическая активность: при использовании обычных имплантатов и обычных инструментов в одних случаях может начаться нежелательный рост клеток, в других – наоборот, непредвиденное их отмирание. Тщательный подбор наноматериалов позволяет избежать обеих проблем.

На структуре из биосовместимых полимерных наноматериалов можно вырастить отдельные ткани и целые органы. Специальный каркас, так называемый матрикс, служит своего рода строительными лесами, на которых выращиваются клетки. Очень хорошо удаются эксперименты по формированию костной ткани: размножающиеся на матриксах клетки-остеобласты позволяют восполнять дефекты кости, а также создать «клей» для костей, помогающий срастаться поврежденным конечностям. Много сложнее эксперименты по выращиванию нервной ткани – однако и здесь есть успехи: в настоящее время, к примеру, ведутся эксперименты на углеродных трубках по ремонту спинного мозга. Биосовместимые материалы позволяют интегрировать в единую систему живые ткани и электронику. В конце прошлого года ученым Портсмутского университета удалось разработать первый биоэлектронный переключатель на основе молекул ДНК: устройство размером в одну тысячную толщины человеческого волоса позволяет соединить живой нерв поврежденной конечности с электронным датчиком управляемого протеза.

На кардинально новый уровень выведут нанотехнологии и микрохирургию – трудящиеся внутри глазного яблока микроскопические роботы смогут вернуть больному зрение, а внедряющиеся непосредственно в мозг наноустройства смогут бороться с его опухолями, а также с психическими заболеваниями, имеющими соматическую почву. Регулируя силу и скорость движения датчика, можно добиваться механического воздействия на клетки и отдельные молекулы. Уже разработаны и химические методы воздействия при по-

мощи наноустройств – локальное анодное окисление молекул клетки например. Точно управляя перемещением капсулы с лекарством, оператор сможет доставлять лекарственные средства непосредственно в пораженные органы.

Канадский наноробот – прототип более совершенных управляемых устройств, способных перемещаться внутри различных органов, убивая атеросклеротические бляшки и раковые клетки, а также проводить сложнейшие микрохирургические операции. Нанореволюция в медицине, разумеется, произойдет не в ближайшие годы, но лет через 10–20 устройства, о которых говорилось, станут, видимо, вполне будничной реальностью.

6.3.4. Мехатронная система для манипуляций на мягких тканях

В медицине существует множество процедур, связанных с посторонними манипуляциями. Эти манипуляции проводят натренированные практикой, обладающие тонким осязательным чувством руки врача, причем часто с использованием зрения. Может ли сегодняшняя техника заменять руки человека, координационные и чувствительные способности которых выше железных? Практика внедрения техники в медицину отвечает на этот вопрос положительно. На Втором Международном симпозиуме по медицинской робототехнике рассматривались многочисленные успешные опыты применения робототехники в диагностике, хирургии, различных видах терапии, протезировании, когда робот был не только советником, но и манипуляционным помощником врача. Выигрыш при применении робота в процедурах достигается за счет более точных, надежных действий, независимых от нервного напряжения врача, его субъективных оценок, а также за счет возможности многократного повторения определенных процедур.

Медицинские роботы можно классифицировать по признаку инвазивности следующим образом. Инвазивные роботы выполняют процедуры резекции, биопсии, пункции. Малоинвазивные роботы перемещаются в полостях и сосудах, осуществляя диагностику и хирургические операции. Неинвазивные роботы манипулируют на мягких тканях, например в мануальной терапии и массаже. Эти ро-

боты могут входить в состав мехатронных систем. Именно об этих системах будет идти речь далее.

Манипуляции на мягких тканях представляют собой механические воздействия на мягкие ткани, вызывающие деформации определенных участков этих тканей (механорецепторов, биологически активных точек, стенок сосудов), что приводит к изменению состояния человека в целом или отдельных его частей и органов. К мягким тканям будем относить упругую биологическую ткань – кожу, жировую прослойку, мышцы. Манипуляции на мягких тканях – это распространенные приемы мануальной терапии и массажа.

С точки зрения механики, массажные движения представляют собой пространственные перемещения рук массажиста (или инструмента в его руках) или руки робота. Разнообразие движений велико – на отдельных участках мягких тканей это прямолинейные, дуговые, спиральные, винтовые траектории. Траектории сильно различаются по причине большого диапазона параметров рельефа поверхности пациентов. В зависимости от величины и направления деформаций мягких тканей массажные техники называются поглаживанием, выжиманием, разминанием, растиранием, защипыванием, оттягиванием.

В приемах мануальной терапии деформации определенных участков мягких тканей достигаются за счет взаимодействия рук врача или инструмента робота не непосредственно с мягкими тканями, а через соединенные с ними кости, конечности. Например, прием «движение конечностей в суставе» вызывает растяжение определенных участков мягких тканей. При этом пациент может быть ослаблен или вызывать волевое напряжение.

Цель манипуляций на мягких тканях состоит в изменении состояния пациента, для здоровых людей – это гармонизация, для больных – терапия.

Впервые идея управления аппаратными средствами массажа с использованием робота была предложена на Втором Международном симпозиуме по медицинской робототехнике в Гейдельберге в 1997 г. Шестизвенный промышленный робот Пума 560, предназначенный для сборки и дуговой сварки, был дополнен силовым датчиком для измерения усилия взаимодействия инструмента робота с мягкими тканями пациента. Робот «чувствует» пациента, запоминает его рельеф, упругость, затем вычисляет массажные траектории и воспроизводит их своими приводами. Штатная система управления

робота, предназначенная для позиционного и контурного управления, могла реализовать лишь простые алгоритмы раздельного позиционно-силового управления. Робот выполнял различные техники классического и точечного массажа на макетах, собаке и людях-пациентах. Отзывы врачей о работе робота-массажиста были положительными, так как движения робота и деформации мягких тканей от инструмента робота были в основном подобны движениям и деформациям от человеческих рук. Преимуществом робота была его неутомимость.

Новый метод аппаратного массажа был защищен российским патентом.

Однако этот робот выполнял только демонстрационные функции. Невозможно было выполнить ряд условий безопасной работы робота в массаже и мануальной терапии с различными пациентами. Штатная система управления робота с ее закрытой программной и аппаратной архитектурой не могла справляться с быстрой обработкой большого количества данных в реальном времени, в частности, с быстрой роботной калибровкой, адаптацией робота к пациентам различных размеров, рельефов, масс. Необходимо было решить следующие проблемы:

- согласование систем координат пациента и робота;
- масштабирование;
- коррекция сдвигов пациента;
- обучение и самообучение;
- диагностика биомедицинских параметров пациента во время процедуры;
- введение биологической обратной связи.

Мехатронные системы

Чтобы решить поставленные выше проблемы, был необходим подход к проектированию системы как сложной системы, функционирующей в неполностью определенной среде. Такой подход представляет мехатроника, связанная с анализом исполнительных движений объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов в них, а также синтезом мехатронных объектов на основе синергетического объединения

механических, электронных, электромеханических и компьютерных составляющих.

Ниже будут рассмотрены три основных компонента мехатронной системы для мануальной терапии и массажа:

- механика взаимодействия рабочего инструмента с мягкими тканями пациента;
- компьютерное управление;
- электромеханический привод.

Характерным для мехатроники является заимствование бионических решений. В данном случае – это антропоморфная геометрия руки; управление, в первую очередь, как воспроизведение известных движений рук врачей; иерархическая структура управления с нейронечеткими моделями для управления в условиях неопределенности.

На рис. 6.18 представлена трехуровневая структура управления мехатронной системой для мануальной терапии и массажа.

Задачей верхнего уровня системы является контроль медицинской процедуры со стороны врача с выработкой необходимой коррекции процедуры. Второй уровень управляет биомедицинскими параметрами, изменяя параметры траектории рабочего инструмента и развиваемых им усилий, являющихся заданными для нижнего уровня позиционно-силового управления.

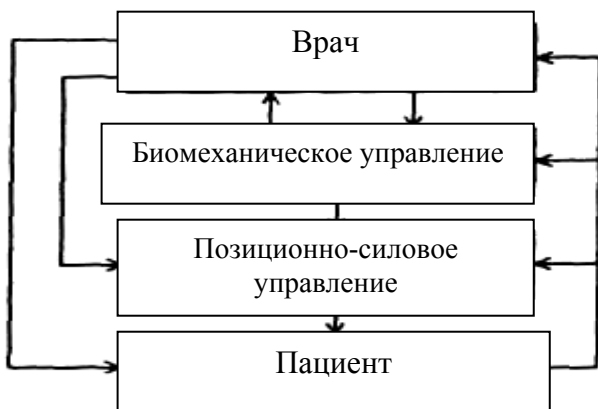


Рис. 6.18. Трехуровневая структура управления мехатронной системой для мануальной терапии и массажа

Специфика объекта управления этой системы (человека), специфика среды (мягких тканей), большое разнообразие техник мануальной терапии, массажа, повышенные требования к безопасности и надежности приводят к необходимости проектирования данной системы как мехатронной.

Системе присущ ряд неопределенностей. Во-первых, траектория инструмента, закрепленного на конечном звене манипулятора, не является заранее определенной и программируемой, как и усилия взаимодействия инструмента с мягкими тканями. Приблизительно определен лишь рисунок движения. Во-вторых, расположение пациента по отношению к манипулятору точно не определено и может меняться во время процедуры. В-третьих, механические параметры мягких тканей (инерционность, вязкость, упругость) различны для пациентов и участков тела и могут изменяться во время процедуры. В-четвертых, неполностью определены необходимые эффективные значения биомедицинских параметров, как и связь их с параметрами механического воздействия.

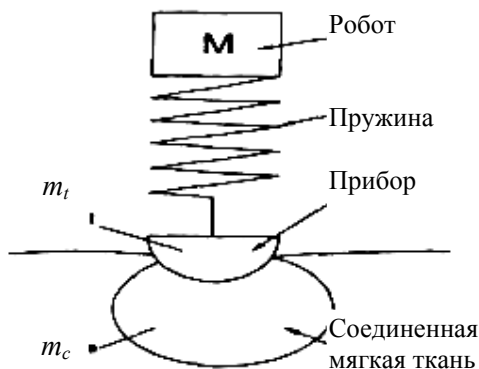


Рис. 6.19. Одноприводная система с тремя массами

Характер приведенных выше неопределенностей связан с наличием в системе двух человеческих объектов – врача и пациента, реакции которых не всегда оцениваются обычной логикой. Поэтому наиболее приемлемой для построения управления может быть не-

четкая логика, а модель системы представляется как нейронечеткая. Однако в данном пособии идеи искусственного интеллекта с участием нейронечетких моделей не рассматриваются, а используются адаптивные подходы.

В качестве примера ниже приводится модель одноприводной системы с тремя массами: M – масса подвижных частей робота; m_t – масса инструмента, закрепленного на кисти робота через компенсирующую пружину; m_e – присоединенная масса мягкой ткани (рис. 6.19).

Для четырех элементов этой системы дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} M(\ddot{q} - \ddot{\Delta}_s) &= F_d + Mg - T; \\ T &= \Delta_s k_s; \\ m_t \ddot{q} &= m_t g - F - T; \\ m_e \ddot{q} &= F + m_e g - \mu \dot{q} - k_e \Delta_e, \end{aligned}$$

где \ddot{q} – смещение инструмента; $\ddot{\Delta}_s$ – деформация пружины; Δ_e – деформация среды; F_d – усилие, развиваемое двигателем; T – сила сжатия пружины; F – сила сопротивления среды; k_e , k_s – коэффициенты упругости и вязкости среды.

Структурная схема, соответствующая дифференциальным уравнениям, приведена на рис. 6.20.

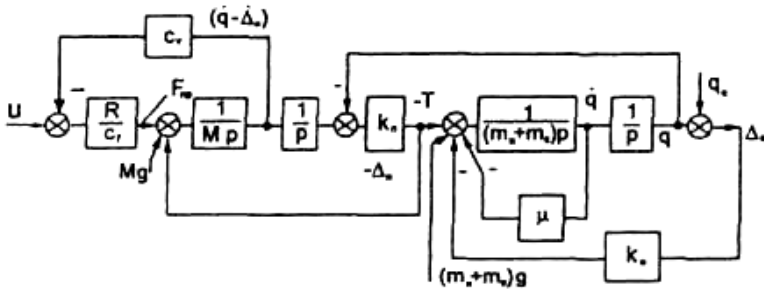


Рис. 6.20. Открытая архитектура контроллера мехатронной системы

Первая реализация робота для мануальной терапии массажа была выполнена на основе промышленного робота РМ-01, таким образом, была продемонстрирована возможность проведения некоторых роботных медицинских процедур, а также определены направления совершенствования робота на пути к разработке мехатронной системы.

Медицинская робототехника, так же как любая медицинская техника, может представлять опасность для врача или оператора, обслуживающего робот, и в особенности для пациента. Привычное для промышленной робототехники требование исключить человека из рабочей зоны робота для медицинского робота является невыполнимым и абсурдным требованием. Поэтому существующие запреты вызваны инерцией мышления, в частности, представлением о медицинском роботе как монстре из фильма ужасов. Однако если говорить о роботах для мануальной терапии и массажа, самая опасная для пациента механика манипулятора должна проектироваться как податливая, оснащенная датчиками усилия, т.е. способная уступать телу пациента как в основной процедуре, так и в случае отказа. Поэтому если рука манипулятора малоинерционная и развивает наибольшие усилия порядка 60 Н, то механические воздействия при отказах не более опасны, чем от ошибок массажиста. Другим препятствием к внедрению медицинской робототехники является инерционное представление о потере психоэмоционального контакта при замене приятных человеческих рук механическими. Проведенные нами исследования говорят о быстром привыкании пациента к мягкому инструменту робота и отсутствию отрицательных эмоций. Особенно наглядно это продемонстрировали опыты на собаке. Собака прижимается к инструменту робота, массаж робота ей нравится.

Поскольку рассматриваемая механическая система должна конкурировать с развитыми многовековой практикой руками человека, шансами на успех являются массовость ее использования и снижение ее стоимости. На сегодняшний день ручное выполнение процедур мануальной терапии и массажа очень распространено, но насколько оно является необходимым и достаточным?

Что касается необходимости, то следует предположить, что как средство релаксации и мобилизации приемы мануальной терапии и массажа жизненно необходимы в такой же степени, как активные волевые движения для человека. Известны такие средства релакса-

ции, как сон, пассивное бездействие, пассивные движения, релаксационный массаж, употребление алкоголя и наркотиков, табакокурение. В этом ряду релаксационных средств пассивные движения конечностей и массаж являются самыми естественными, нерадикальными, неинвазивными, немедикаментозными, без побочных отрицательных эффектов.

Область применения этих техник очень широка. Это терапевтическое воздействие для больных следующих категорий:

- травмированные на производстве и войне;
- больные церебральным параличом;
- страдающие невралгиями, остеохондрозом, артритами;
- лежачие больные в послеоперационный период.

6.4. Информационные системы в комплексах технической диагностики

6.4.1. Диагностика материалов оптико-телевизионными измерительными системами

Изменения, происходящие внутри деформируемого материала, находят однозначное отражение в изменениях рельефа его поверхности. Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемого материала может быть произведена по анализу этого рельефа. Поэтому изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов мезосубструктуры на поверхности позволяет проследить динамику развития процессов, протекающих в исследуемом материале в целом [14].

По типу используемого излучения системы неразрушающего контроля и диагностики (СНКД) делятся на электронные (растровые электронные микроскопы), оптические (оптические микроскопы, оптико-телевизионные системы, лазеры), ультразвуковые (акустические и эмиссионные излучатели), рентгеновские (просвечивающие) и радиометрические (измерители радиации, радиолокаторы). По принципу действия СНКД можно подразделить на тактильные (механические профилометры), интерференционные, дифракционные, проекционные, дефектоскопические и обзорно-сравнительные (сравнивающие текущую и эталонную информацию – изображения). По функциональному назначению СНКД классифицируются на из-

мерители параметров топологии (рисунка) и микрорельефа, измерители чистоты поверхности, измерители несплошностей или трещин материала или конструкций (внешних и внутренних).

В соответствии с приведенной классификацией для аттестации наноматериалов согласно техническому заданию будут использоваться СНКД следующего состава: тип используемого излучения (электронное, оптическое, ультразвуковое), принцип действия, функциональное назначение (измерители параметров топологии (рисунка) и микрорельефа, измерители несплошностей или трещин (внешних и внутренних), способ обработки сигнала (цифровой), вид получаемой рабочей информации (одномерная, двухмерная, трехмерная).

Т а б л и ц а 6.1

Признаки в области деформации

№ п/п	Тип материала	Характерный элемент мезосубструктуры	Информативный признак
1	Пластичный поликристалл (растяжение)	Зерно, конгломерат зерен	Площадь, ориентация, периметр, коэффициент формы, координаты центра тяжести
2	Высокопрочный дисперсно-упрочненный сплав (растяжение)	Мезополоса (распространяющаяся через многие зерна)	Длина, ширина, период
3	Сдвигоустойчивый поликристалл (растяжение)	Мартенситные ламели. Поперечная мартенситная полоса	Длина, период, ориентация. Длина, ширина
4	Мелкозернистый поликристалл (растяжение)	Дисклинация, змейка	Длина, ориентация, ширина
5	Высокоазотистая сталь, негартованная прокаткой (растяжение)	Мезополосовая структура	Площадь, период полос, длина, ориентация
6	Малоуглеродистая сталь (растяжение)	Полоса Людерса	Ориентация, длина
7	Сварное соединение (растяжение)	Макрополоса (в зоне термического влияния)	Длина, ориентация, ширина
8	Усталостное разрушение	Петля деформированных зёрен	Площадь, периметр, координаты центра тяжести, коэффициент формы, периметр

При исследовании различных материалов выделяют характерные признаки в области деформации (табл. 6.1).

Для анализа процессов, происходящих внутри материала при неразрушающем контроле, необходимо получить изображение поверхности исследуемого материала. В связи с тем, что в процессе получения изображений неизбежно воздействие помех, необходимо предусмотреть процедуру предварительной обработки изображения для улучшения его качественных характеристик. Для анализа процессов, происходящих в исследуемом материале, применяются корреляционные алгоритмы. Необходимо разработать методику, позволяющую применять эти алгоритмы с различными параметрами для обработки серии изображений, получаемых в процессе исследования материала.

6.4.2. Оптико-телевизионная система для диагностики материалов

Для получения изображений поверхности исследуемого материала используется оптико-телевизионная измерительная система (ОТИС) (рис. 6.21) [8].

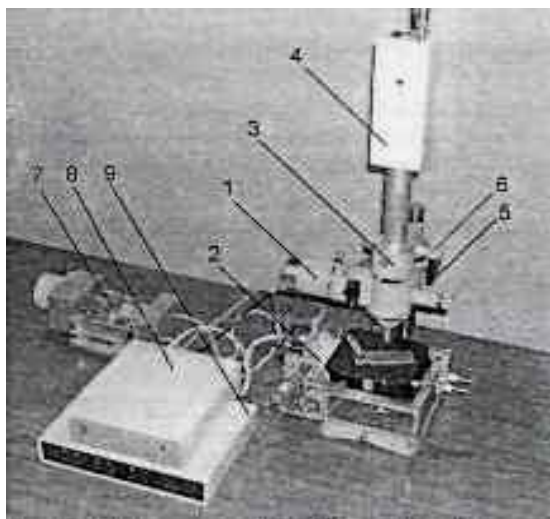


Рис. 6.21. Оптико-телевизионная измерительная система

Основные конструктивные блоки: 1 – устройство подсветки; 2 – механизм сканирования, включающий в себя несущие конструкции, два шаговых двигателя, четыре датчика-ограничителя; 3 – оптико-механический узел металлографического микроскопа; 4 – телевизионная камера; 5 – микровинт точной настройки фокусировки; 6 – микровинт грубой настройки фокусировки; 7 – устройство нагружения, в состав которого входят шаговый двигатель с блоком управления для деформации образца, механизм растяжения/сжатия, четыре тензодатчика, аналого-цифровой преобразователь; 8 – блок питания; 9 – устройство управления, включая печатную плату с размещенными на ней электронными компонентами.

Все элементы расположены внутри корпуса. На задней панели корпуса расположены разъем для подключения блока питания, разъем последовательного интерфейса для подключения к компьютеру, разъем для подключения устройства подсветки, два разъема для подключения шаговых двигателей. На передней панели корпуса расположены кнопки управления шаговыми двигателями и устройством подсветки, а также светодиоды, отображающие состояние датчиков-ограничителей; блок питания с тумблером и светодиодом.



Рис. 6.22. Обобщенная структурная схема ОТИС

Элементы структурной схемы (рис. 6.22) выполняют следующие функции: определение параметров деформации материала; распо-

знание (нахождение) области деформации; размер деформируемой области (площадь, периметр, длина, ширина); величина смещения деформируемой области и ее элементарных площадок; структурные (рисунк, цвет) признаки деформируемой области.

Технические характеристики ОТИС:

Быстродействие оценки параметров 1 кадра ~1 с.

Абсолютная погрешность оценки смещения (деформации) области и элементарных площадок исследуемого материала 0,1 мкм.

Число пикселей телевизионного изображения до 7 млн.

Рабочая зона 150×150 мм.

Размер исследуемого образца 10×10×100 мм.

Масса установки 7 кг.

Габариты 300×300×500 мм.

Питание 220 В 50 Гц, потребляемая мощность не более 100 Вт.

Полученные с помощью ОТИС изображения сохраняются на жестком диске компьютера для дальнейшей обработки с помощью программных продуктов.

Процессы предварительной обработки изображения реализованы в отдельном программном продукте (рис. 6.23). Основной целью предварительной обработки является удаление шумов, улучшение контрастности и т.д.

Число методов для предварительной обработки основных параметров изображения довольно велико, но требованиям по скорости вычислений и по эксплуатационной стоимости, лежащим в основе систем технического зрения ОТИС, удовлетворяет только определенная подгруппа этих методов.

Сглаживание. Операции сглаживания используются для снижения шума и других помех, которые могут появляться на изображении в результате дискретизации, квантования, передачи или возмущений внешней среды при получении изображения.

Усреднение окрестности. Для имеющегося изображения $f(x, y)$ процесс заключается в получении сглаженного изображения $g(x, y)$, интенсивность которого в каждой точке (x, y) равна усредненному значению интенсивности пикселей функции f , содержащихся в заданной окрестности точки (x, y) . Другими словами, сглаженное изображение получается при использовании соотношения для всех x и y функции $f(x, y)$, где S – множество координат точек в окрестности

точки (x, y) , включая саму точку (x, y) , а P – общее число точек в окрестности.

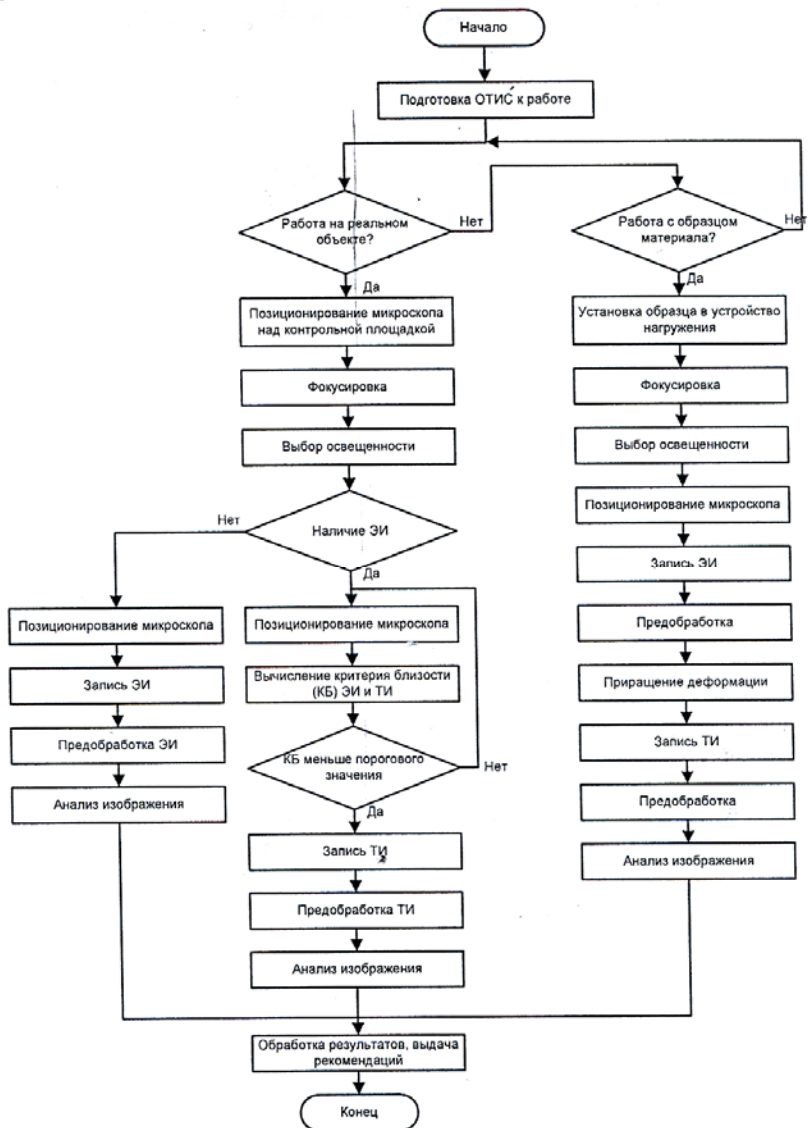


Рис. 6.23. Схема программного обеспечения ОТИС

$$g(x, y) = \frac{1}{P_{(n,m) \in S}} \sum f(n, m). \quad (6.1)$$

В соответствии с приведенными выше методами была разработана программа. В ней реализованы методы сглаживания изображения усреднением окрестности и усреднением серии изображений, возможно получение бинарного изображения. Результат сглаживания изображения представлен на рис. 6.24. Слева показано исходное изображение, полученное с помощью ОТИС.

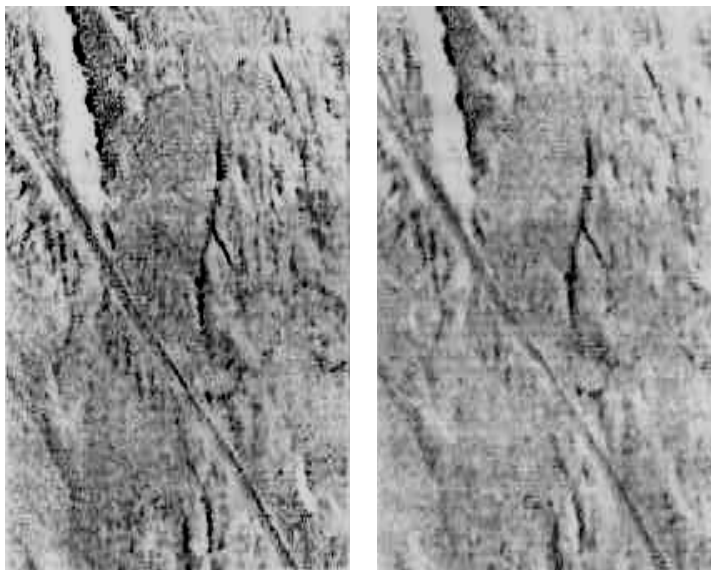


Рис. 6.24. Результат сглаживания изображения

Справа показано обработанное изображение. В результате сглаживания помехи на изображении частично удалены, частично сделаны менее заметными. Сглаженное изображение более пригодно для проведения бинаризации. Сравним результаты бинаризации исходного и сглаженного изображения (рис. 6.25).

По результатам бинаризации изображений видно, что при обработке сглаженного изображения контуры объектов получаются четкими, без шероховатостей. Области, занимаемые исследуемыми объектами, легко выделяемы.

Для получения достоверной численной информации о механическом состоянии материала под нагрузкой возможно использование методов измерения фрактальной размерности. Используя до этого в неразрушающем контроле методы и средства предназначались в основном для обнаружения в деформируемом материале трещин, что часто является недопустимым при эксплуатации реальных изделий и конструкций. Эволюция процессов внутри деформируемого материала должна приводить к образованию на поверхности субструктуры, имеющей фрактальный характер.



Рис. 6.25. Результат бинаризации с локальным порогом исходного и сглаженного изображений стали

Подобный подход позволяет определять степень деформации с помощью численной характеристики, получаемой на основе анализа субструктуры, наблюдаемой на поверхности материала под нагрузкой.

6.4.3. Методы измерения значения фрактальной размерности. Метод нормированного размаха

Метод базируется на положении о том, что многие временные ряды можно исследовать с помощью статистического подхода – метода Херста [1].

Для каждого промежутка наблюдений определяется среднее значение интенсивности по формуле

$$\Psi_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \Psi(t), \quad (6.2)$$

где t – количество учитываемых отрезков в промежутке, Ψ_{τ} – средняя яркость в рассматриваемом отрезке. Затем вычисляем накопившееся отклонение яркости от средней Ψ_{τ} :

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \Psi(u) - \Psi_{\tau} \}, \quad (6.3)$$

где $\Psi(u)$ – значение интенсивности в каждом пикселе рассматриваемого участка. Величину размаха находим, как разность минимального и максимального отклонения:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min(t, \tau). \quad (6.4)$$

Теперь рассчитываем стандартное отклонение:

$$S = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^r (\Psi(t) - \Psi_r) \right), \quad (6.5)$$

$$R/S = (r/2)^H, \quad D = 2 - H. \quad (6.6)$$

В качестве временных рядов используются строки, столбцы и диагональные элементы исследуемого изображения. Значение фрактальной размерности вычисляется для каждого такого временного ряда с последующим ее усреднением по всему изображению. Расчет производится исходя из условия, что в каждом временном ряду может быть выделено несколько различных выборок с длиной соответственно 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 и 576 (768) пикселей.

Затем вычисляются R/S – отношения по приведенным выше формулам (6.2)–(6.5) для каждой выборки. После этого в логарифмическом масштабе строится зависимость R/S -отношения от величины выборки. Далее по методу наименьших квадратов производится аппроксимация полученной кривой и определение угла ее наклона по следующей зависимости:

$$y = a + bx,$$

где

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i - N \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (6.7)$$

$$a = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right).$$

Коэффициент b , определяющий угол наклона аппроксимирующей кривой, также определяет и значение показателя Херста H . Основным недостатком данного метода является то, что при расчете значения ФР двумерное изображение заменяется набором некоторых временных рядов с последующим их усреднением.

6.4.4. Метод серии изображений

При определении фрактальной размерности данным методом необходимо иметь серию изображений участка поверхности, снятых при различных увеличениях.

Определение фрактальной размерности D производится по формулам:

$$L = L_0 T^{1-D'}, \quad D = D' + 1, \quad (6.8)$$

где T – масштаб изображения; L – длина профилей строк; L_0 – длина проекции профилей.

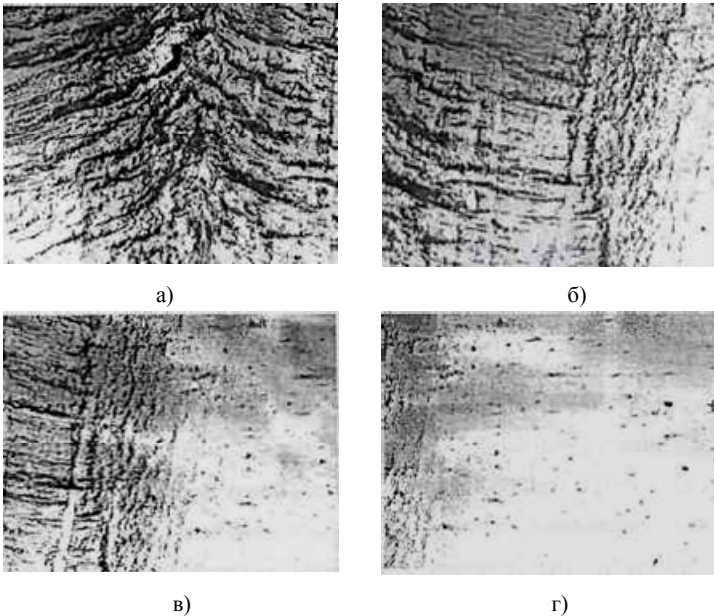


Рис. 6.26. Область разлома на разном расстоянии от места разрушения:
а – 0 мм; б – 0,5 мм; в – 1 мм; г – 1,5 мм

На практике данный расчет осуществляется следующим образом. Сначала для каждого изображения, полученного при коэффициенте увеличения T , рассчитывается длина профиля каждой строки. Затем вычисляется общая длина всех строк изображения L и находится ее отношение к длине проекций этих строк L/L_0 . После этого строится график зависимости L/L_0 от δ в логарифмическом масштабе. Затем на графике выбирается участок, отстоящий на 15 % от максимального и минимального значения этой функции, и производится аппроксимация данного участка методом наименьших квадратов. На рис. 6.26 показана серия снимков области разлома материала.

Используя приведенные алгоритмы, можно вычислить значение фрактальной размерности для данных изображений (рис. 6.27).

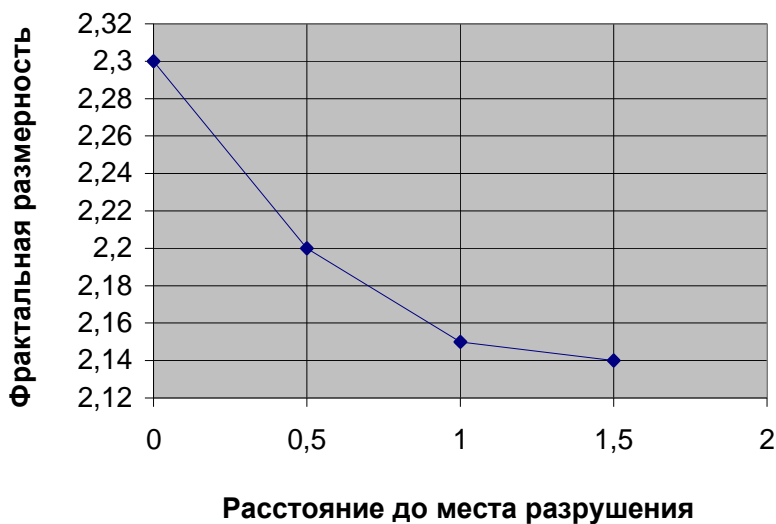


Рис. 6.27. Результат измерения фрактальной размерности по полученным изображениям

6.4.5. Корреляционные статистические алгоритмы

При помощи светового металлографического микроскопа снимаются эталонное изображение (ЭИ) исследуемого участка поверхности образца (до приращения деформации) и текущее изображение

(ТИ) этого же участка (после приращения деформации). ТИ и ЭИ разбиваются одинаково на равное число фрагментов (элементарных квадратных площадок). Каждый фрагмент ЭИ сравнивается с соответствующим фрагментом ТИ и определяется смещение фрагмента ТИ относительно фрагмента ЭИ. Выделим три основных алгоритма сравнения: модифицированный корреляционный, разностный и разностный быстрый.

Анализируя серию таких изображений, снятых в процессе разрушения материала при проведении эксперимента, по длине и направлению векторов можно проследить динамику процессов разрушения и движение пластов поверхности (мезосубструктур). При анализе файлов изображений можно уменьшить зависимость от этих факторов путем подбора размера элементарных площадок. Рассмотрим процесс исследования образца под нагрузкой (рис. 6.28).

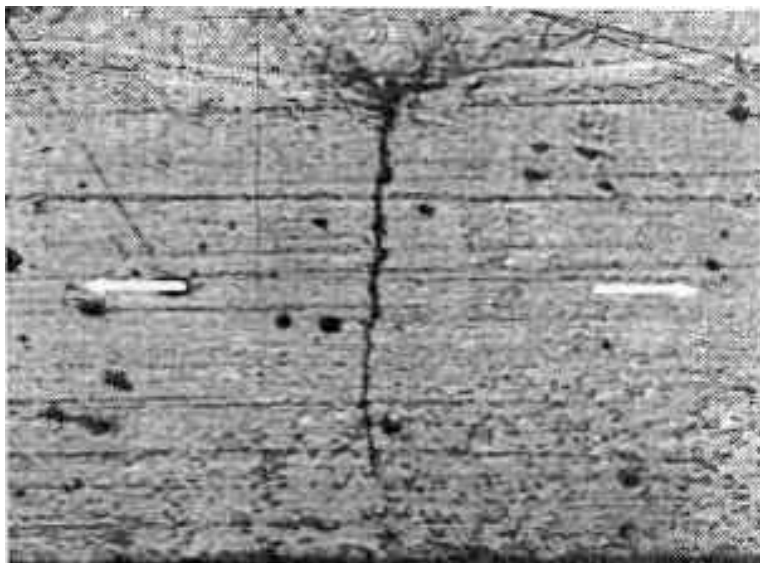


Рис. 6.28. Изображение поверхности деформируемого материала

Места разрыва материала на картах смещения векторов можно обнаружить по характерным областям, называемым «вихрями». Эти области характеризуются разнонаправленностью векторов смещения и хаотичностью направления и величины векторов смещений. Как видно из рисунка, такие области расположены по центру изображения снизу вверх, и затем в стороны под углом 90° . На исходном изображении (см. рис. 6.28) в этих местах видны деформации в виде темных областей.

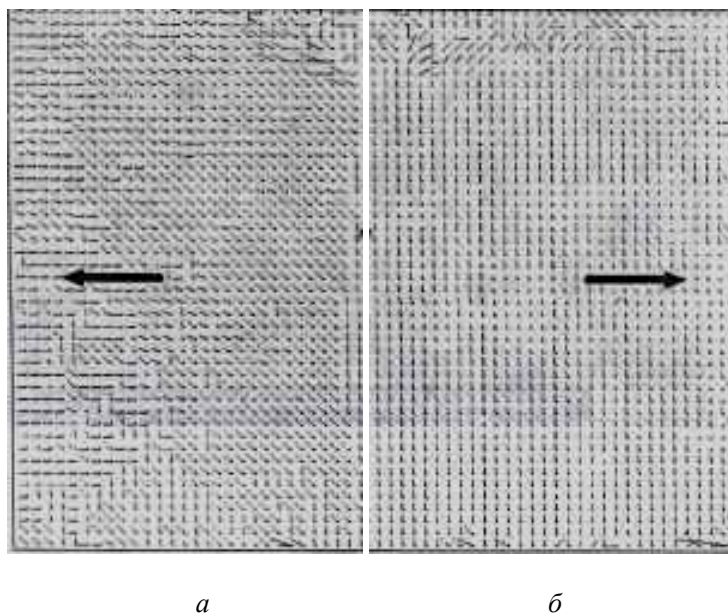


Рис. 6.29. Карты векторов смещения при различных размерах элементарной площадки

На рис. 6.29 показан результат работы программы при размерах площадки 16 (*a*) и 24 (*б*) пикселя.

Данный программный комплекс предназначен для исследования неорганических объектов. Методы, описанные в пособии, применимы для исследования как неорганических, так и органических структур. Исследование органических структур обуславливает необходи-

мость в использовании для анализа цветных изображений, т.е. дополнительно изучение цветовой информации об объекте исследования.

Разработанное программное обеспечение (ПО) позволяет использовать результаты математической обработки изображения для диагностики органических и неорганических материалов. Поверхность исследуемых материалов отражает поступающий свет от источника освещения и вызывает появление бликов на изображении, получаемом малогабаритной видеокамерой. Блики на изображении исключаются из обработки для достоверности получаемых результатов. Проанализировав частоту различных цветовых оттенков на изображениях здоровых органов и органов, имеющих различные отклонения, можно сделать вывод, что они значительно отличаются.

На основании проведенного анализа нескольких изображений материалов, полученных с помощью ОТИС, была выделена область спектра, в которую укладываются спектры эталонных образцов.

В результате проведенной работы рассмотрен аппаратно-программный комплекс для исследования различных материалов под нагрузкой, а также были рассмотрены методы, на которых основывается ПО для анализа деформированного материала. Данные методы ПО позволяют выяснить характер и степень деформации, а также получить качественные характеристики рельефа поверхности, проанализировать динамику процессов, происходящих в материале. Программа вычисляет отношение точек конкретного изображения, цветовые оттенки которых попадают в эту область, к общему числу точек и использует полученную величину как меру соответствия спектра изображения исследуемого материала спектру, характерному для эталонного образца. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики материалов в различных областях науки и техники.

В дальнейшем планируется расширить область применения данного аппаратно-программного комплекса для анализа морфологических и оптических характеристик микро- и наноструктурированных материалов, обеспечивающих автоматизированное сканирование образцов, компьютерную обработку, анализ и цветную визуализацию объектов на базе оптического микроскопа.

6.5. Цифровая рентгеновская 3D-микротомография

Современной науке доступны методы анализа внутренней микроструктуры объекта различными способами. Одним из лучших методов неразрушающей визуализации является метод рентгеновской микротомографии, которая дает возможность получать изображение внутренней структуры непрозрачных объектов в трехмерном виде с высоким пространственным разрешением. Существует необходимость изучения внутренней структуры объектов, непрозрачных в видимом диапазоне электромагнитного излучения, особенно биологических, с микронным разрешением. Развитие методов рентгеновской микроскопии позволило заглянуть внутрь непрозрачных объектов с разрешением, превышающим возможности оптической микроскопии. Сегодня рентгеновская микротомография имеет широкий спектр областей применения. Используемые алгоритмы позволяют достигать высокой степени детализации и высокой точности восстановления и анализа 3D-модели. Это даёт возможность применять метод рентгеновской томографии для осуществления неразрушающего контроля качества материалов и изделий в производственно-технологических целях в следующих отраслях промышленности:

- в металлургии для оценки качества состава и структуры выпускаемых продуктов;
- в машиностроении и приборостроении для контроля качества используемых деталей и их сборки;
- в электронной промышленности для анализа сборки полупроводниковых приборов, а также припайки контактов электронных компонентов к печатным платам.

Рентгеновская микротомография также может применяться в научно-исследовательских целях для изучения внутренней структуры органических и неорганических объектов в следующих областях:

- в биологии и медицине для оптимизации рентгенологических методов исследования и диагностики;
- в физике при проведении различных экспериментальных исследований, реализованных посредством применения, для визуализации внутренней структуры объектов и физических процессов, происходящих в исследуемых образцах;

- в химии для визуализации внутренней структуры опытных образцов, позволяющей наблюдать за механизмом появления дефектов, при создании и исследовании материалов. В пособии описывается оригинальный интеллектуальный рентгеновский микротомограф (ИРМТ).

Структура томографа

ИРМТ работает следующим образом.

Блок рентгеновского излучения (БРИ) облучает объект, который размещается на управляемой рабочей зоне (УРЗ). Рентгеновские лучи БРИ, проникая через объект, поступают на блок детекторов, воспринимающий поэлементно полный кадр изображения внутренней структуры объекта.

Аналоговый сигнал от блока детекторов оцифровывается АЦП и поступает на ЭВМ, на второй вход которой приходит цифровой сигнал от второго АЦП, преобразующий сигнал от блока измерения энергетического спектра рентгеновского излучения (БИЭСРИ). Этот блок измеряет составляющие спектра сигнала, снимаемого с блока детекторов.

Считывание изображения блоком детекторов осуществляется при вращении объекта вокруг вертикальной оси и смещении объекта вдоль вертикальной, горизонтальной и поперечной осей. Такие манипуляции с объектом производятся блоком электромеханики через управляемую рабочую зону (УРЗ), куда устанавливается объект. Уточнение (корректировка) перемещений УРЗ осуществляется блоком адаптивного структурно-перестраиваемого управления (БАСПУ). Цифровые сигналы от первого и второго АЦП поступают на ЭВМ, которая преобразует сигналы в цифровой массив, отображающий кадр энергетического спектра рентгеновского изображения.

Структурная схема ИРМТ представлена на рис. 6.30.

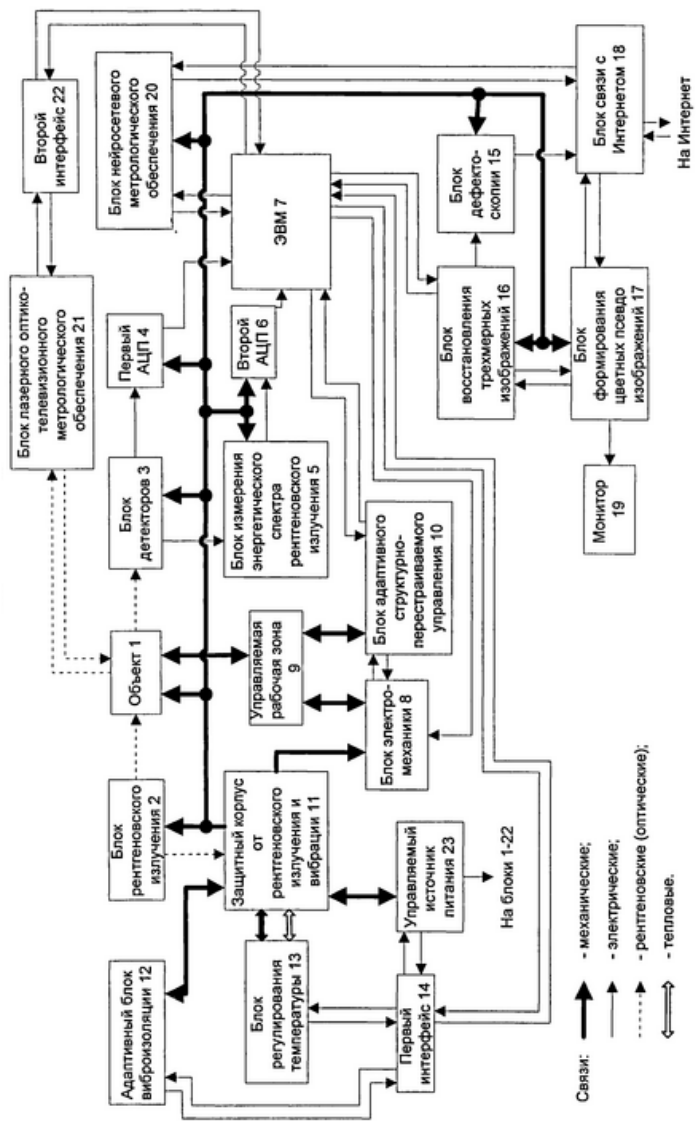


Рис. 6.30. Структурная схема ИРМТ

ИРМТ включает: 1 – объект; 2 – блок рентгеновского излучения (БРИ); 3 – блок детекторов (камера на приборе с зарядовой связью (ПЗС)); 4 – первый аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – блок измерения энергетического спектра рентгеновского излучения (БИЭСРИ); 6 – второй АЦП; 7 – электронно-вычислительная машина (ЭВМ); 8 – блок электромеханики; 9 – управляемая рабочая зона; 10 – блок адаптивного структурно-перестраиваемого управления (БАСПУ); 11 – защитный корпус от рентгеновского излучения и вибрации (ЗКРИВ); 12 – адаптивный блок виброизоляции; 13 – блок регулирования температуры (БРТ); 14 – интерфейс; 15 – блок дефектоскопии; 16 – блок восстановления трехмерных изображений (БВТИ); 17 – блок формирования цветных псевдоизображений (БФЦП); 18 – блок связи с Интернетом (БСИ); 19 – монитор; 20 – блок нейросетевого метрологического обеспечения (БНМО); 21 – блок лазерного оптико-телевизионного метрологического обеспечения; 22 – второй интерфейс; 23 – управляемый источник питания (УИП).

Структурная схема программного обеспечения приведена на рис. 6.31.

Математически результат 3D-реконструкции – это трехмерные матрицы чисел, представляющих собой плотности различных участков исследуемого объема. Измеренные значения чисел в ячейках матрицы зависят от вида исследуемого объекта и лежат в определенном диапазоне, позволяя получить объемные изображения внутренних структур исследуемого объекта. Трехмерные реконструкции дают наглядную картину пространственного расположения структур, повышают распознавание значимых деталей, дефектов и неоднородностей. Вместе с тем структуры, имеющие высокую плотность, могут скрыть другие структуры с равной или меньшей плотностью.

Решением проблемы становится ручная или автоматическая процедура удаления внешних слоев с более высокой плотностью, позволяющая получить реконструкцию интересующих внутренних структур с различной степенью прозрачности по сечению, определенному исследователем [4].



Рис. 6.31. Структурная схема программного обеспечения анализа 3D-изображений

В томографии используются следующие основные алгоритмы построения объемных реконструкций:

- проекция максимальной интенсивности;
- реконструкция с затененной наружной поверхностью;
- объемное представление;
- виртуальная эндоскопия.

Проекция максимальной интенсивности (Maximum Intensity Projection, MIP) состоит из вокселей, имеющих максимальную плотность. В этом методе на выбранную базовую плоскость по ходу распространения луча зрения проецируются сигналы со всего набора двумерных изображений исследуемой зоны. Таким образом, получаемая проекция всегда представляет комбинацию вокселей внутри отображаемого объема, имеющих максимальную интенсивность. Альтернативой MIP-изображениям является отображение пикселей, имеющих минимальную интенсивность (MinIP), с помощью которых можно отображать такие структуры, как пустоты.

При реконструкции с затененной наружной поверхностью выбирается некоторое пороговое значение диапазона отображаемых элементов. Все воксели, превышающие пороговое значение, вносят вклад в итоговое изображение, при этом поверхность 3D-реконструкции формируется первыми вокселями, чьи интенсивности превышают выбранный порог, находящимися на выбранном луче зрения.

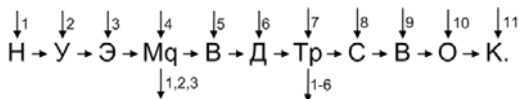
Эффект затенения усиливает ощущение глубины, однако теряется исходная информация о плотности. Также необходимо учитывать, что получаемое изображение зависит от выбранного порога, поэтому такие изображения скрывают часть информации.

Метод объемного представления (Volume Rendering) является сочетанием первых двух методов и позволяет реконструировать 3D-модель из набора срезов. Получаемые реконструкции не имеют ограничения максимальной интенсивности, и все значения плотности элементов вдоль виртуального луча вносят вклад в итоговое изображение в соответствии с их весом. Каждому элементу приписываются определенные яркость, цвет и прозрачность, что позволяет одновременно выделить из исходного набора данных множество структур, имеющих различную плотность.

Виртуальная эндоскопия используется для получения изображений внутренних полостей или структур с меньшей плотностью. В этом режиме интересующие полости отображаются с помощью объемного представления в перспективе, что дает ощущение «полета» через отображаемую область.

Использование различных методов реконструкции позволяет существенно повысить информативность полученных данных, в том числе за счет наглядности пространственного расположения исследуемых тканей.

В общем виде операторная схема алгоритма работы ИРМТ запишется следующим образом:



Разъясним смысл введенных операторов.

Оператор H означает начало работы ИРМТ: узлы и блоки ИРМТ в целом подготавливаются к работе (возврат в исходное состояние, очистка памяти и т.п.) и вырабатывается команда для синхронизатора, определяющего последовательность операций.

Оператор U означает подготовку и установку образца (объекта исследования) в рабочую зону (поверхность столика). Этой операции предшествует подготовка образца (обеспечение размеров образца).

Оператор M включает блок метрологического обеспечения, в том числе систему цветного телевизионного контроля, а также систему обеспечения безопасности ИРМТ. Здесь необходимо выполнение условия q : объект исследования не превышает требуемые размеры и физические характеристики (например, твердость, возникающие внешние вибрации не оказывают влияние на измерение), в противном случае управление переходит к одному из операторов H , U , Ξ .

Оператор B включает высоковольтный источник питания и систему контроля стабильности его работы путем отображения на мониторе блока метрологического обеспечения.

Оператор D включает детектор, воспринимающий рентгеновский сигнал, проходящий через объект исследования. Детектор преобразует рентгеновский сигнал в аналоговый электрический, а затем в цифровой. Здесь включаются блоки питания и охлаждения детектора.

Оператор T формирует тестовые сигналы для проверки всех модулей (электронных, мехатронных и программных), оценивает их состояние и выдает разрешающий сигнал в случае соответствия техническим требованиям ИРМТ.

Оператор C формирует массив двумерных изображений объекта при перемещении и вращении объекта исследования в рабочей зоне (т.е. считывание изображения при сканировании объекта исследования). Здесь необходимо выполнение условия p : мощность рентгенов-

ского излучения достаточна для проведения измерений, все модули ИРМТ функционируют правильно, в противном случае управление переходит на один из операторов Н, У, Э, М, В, Д.

Оператор В формирует, обрабатывает и анализирует трехмерное изображение и выполняет следующие операции:

а) восстанавливает 3D-изображение внутренней структуры материала;

б) обрабатывает изображение (фильтрует, позирует);

в) анализирует несплошности (дефекты) материала;

г) представляет цветное трехмерное изображение (раскрашивает несплошности).

Оператор О отображает и передает полученную информацию.

Оператор К свидетельствует об окончании работы ИРМТ.

Погрешность томографа

На разрешающую способность ИРМТ влияют такие параметры, как точность системы позиционирования $\Delta_{\text{поз}}$, размер фокального пятна трубки $\Delta_{\text{рентг}}$ (зависит от характеристик выбранной рентгеновской трубки), разрешение детектора рентгеновского излучения $\Delta_{\text{дет}}$ (характеризуется параметром выбранного детектора) [7]. То есть разрешающая способность РМТ складывается из нижеприведенных параметров:

$$\Delta_{\text{сумм}} = \Delta_{\text{рентг}} + \Delta_{\text{поз}} + \Delta_{\text{дет}}.$$

Таким образом, основные характеристики РМТ, разрешающая способность и скорость реконструкции изображения исследуемого объекта зависят от следующих параметров:

1. Параметры рентгенооптической системы.

2. Параметры электромехатронной системы позиционирования.

3. Параметры блока обработки данных.

При прохождении через вещество интенсивность рентгеновского излучения уменьшается по закону, характерному для электромагнитного излучения (закон Ламберта–Бугера):

$$I = I_0 \exp(-\mu x),$$

где I и I_0 – конечная и начальная интенсивности излучения соответственно; μ – полный линейный коэффициент ослабления; x – толщина слоя вещества. Коэффициент μ зависит от длины волны и плотности поглощающего материала.

На основе расчета интенсивности рентгеновского излучения и в зависимости от объекта рассчитывается толщина просвечиваемого материала.

Проекционным увеличением называют отношение линейного размера элемента теневого изображения объекта исследования, сформированного точечным источником ионизирующего излучения, к размеру соответствующего объекта исследования.

Математически проекционное увеличение M можно вычислить по следующим отношениям:

$$M = \frac{D_F}{D_0} = \frac{d_F}{d_0},$$

где d_0 – расстояние от фокусного пятна рентгеновской трубки до объекта; d_F – расстояние от фокусного пятна рентгеновской трубки до детектора; D_0 – размер объекта исследования; D_F – проекционное увеличение объекта исследования.

Степень геометрической нерезкости любой тени зависит от размеров источника излучения (фокусного пятна или активной части) и от положения контролируемого объекта между источником и радиационным изображением (рис. 6.32а, 6.32б).

Суммарную погрешность рентгенооптической системы характеризует степень геометрической нерезкости:

$$u_{\Gamma} = d \frac{\delta^*}{F_0} = d \frac{\delta^*}{(F - \delta^*)},$$

где d – размер источника излучения; δ^* – расстояние от элемента объекта контроля до детектора; F_0 – расстояние от источника излучения до объекта контроля; F – фокусное расстояние.

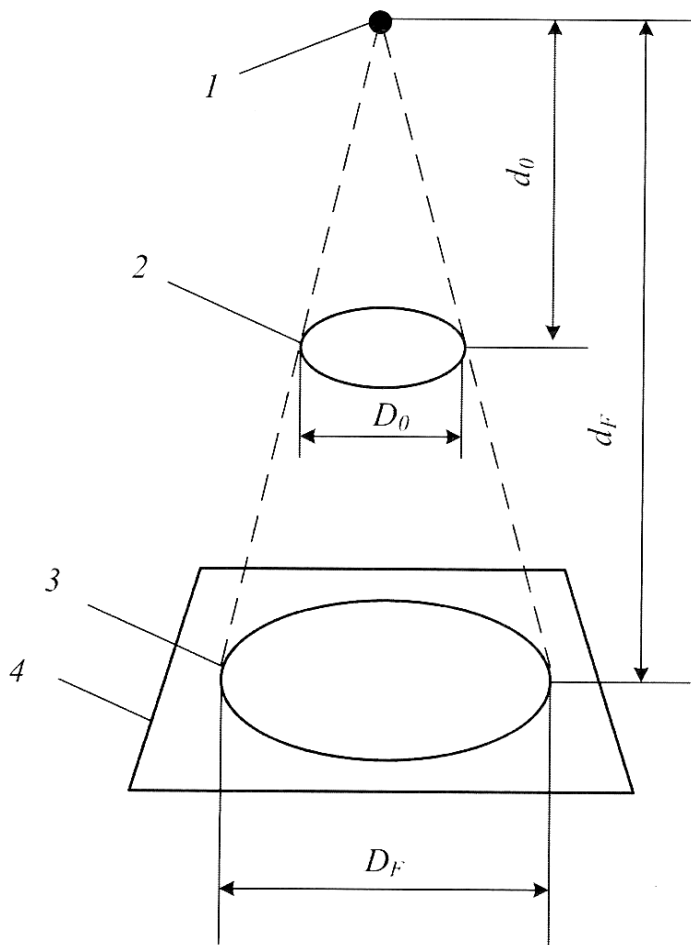


Рис. 6.32а. Схема проекционного увеличения при радиационном контроле:
1 – точечный источник; 2 – объект исследования;
3 – элемент теневого изображения; 4 – радиационный преобразователь

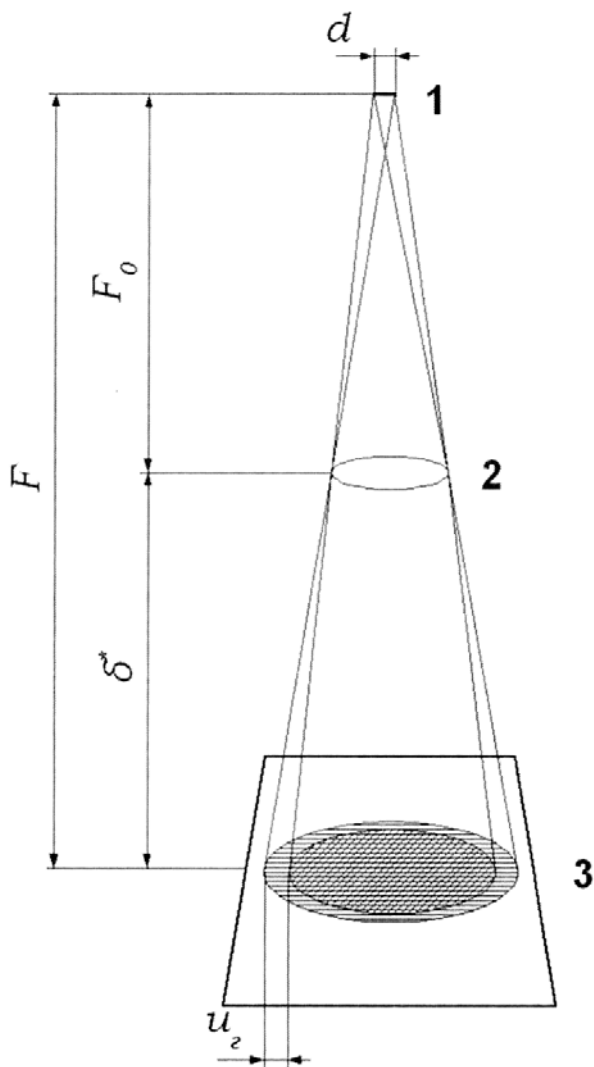


Рис. 6.326. Схема формирования геометрической нерезкости от фокусного расстояния: 1 – источник излучения; 2 – элемент объекта контроля; 3 – матрица детектора

Если детектор помещать в непосредственной близости от объекта контроля, то δ^* можно считать равной толщине объекта δ .

Условие соразмерности геометрической нерезкости определяют из следующего: $u_{\Gamma} \leq u_B$ – при просвечивании тонкостенных изделий; $u_{\Gamma} \leq u_p$ – при просвечивании изделий большой толщины, когда рассеянное излучение существенным образом ухудшает выявляемость дефектов. Для уменьшения геометрической нерезкости следует применять источники излучения с малым фокусным пятном.

Фокусное расстояние F следует выбирать таким образом, чтобы геометрическая нерезкость u_{Γ} была соизмерима со значением внутренней нерезкости u_B ($u_B \approx u_{\Gamma}$).

Для определения фокусного расстояния используют соотношение

$$F = \delta^* \left(\frac{d}{u_B} + 1 \right).$$

Увеличение фокусного расстояния F позволяет уменьшить нерезкость, но при этом снижается интенсивность излучения и увеличивается время экспозиции.

В рентгеновских трубках малое фокальное пятно позволяет получить лучшее разрешение. Чем пятно больше, тем больше размыты контуры и больше ограничено разрешение получаемого изображения [7].

Характеристики ИРМТ:

- Различимость деталей 1–13 мкм.

Источник рентгеновского излучения – плавно настраиваемый от 20 до 160 кВ, ток анода 0–250 мкА, 10 Вт, размер фокального пятна < 5 мкм (\cong 4 Вт) с воздушным охлаждением.

- Датчик рентгеновского излучения – 2048 \times 2048 12-bit, цифровая рентгеновская камера с 27,6 \times 27,6 мм полем обзора.

- Время восстановления трехмерных изображений 10 (мин/см³); время анализа трехмерных изображений – 60 (мин/см³).

Экспериментальные исследования

Примером исследования элементов материалов могут служить реконструированные на микротомографе тиристор, транзистор, све-

одиод. Примером исследования элементов РЭА могут служить реконструированные на микромогرافе материалы: тиристор, транзистор, светодиод.

Сканирование объектов исследования позволяет получить полные сведения о внутренней пространственной микроструктуре образца с микронным и субмикронным пространственным разрешением, сохраняя структуру образца. На рис. 6.33 представлены сечения элементов РЭА, на которых видна структура объекта.

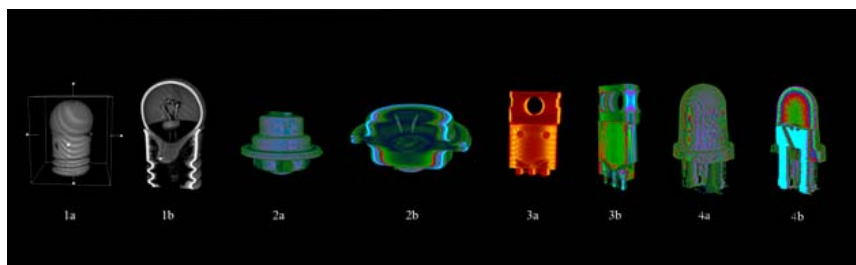


Рис. 6.33. Реконструкция образцов: *1a* – 3D-модель лампочки; *1b* – разрез лампочки; *2a* – 3D-модель тиристора; *2b* – разрез тиристора; *3a* – 3D-модель транзистора; *3b* – разрез транзистора; *4a* – 3D-модель светодиода; *4b* – разрез светодиода

На основе описанных данных разработан первый отечественный интеллектуальный цифровой рентгеновский микромогراف для диагностики состояния материалов и элементов радиоэлектронной аппаратуры. Оценена погрешность и проведены экспериментальные исследования микромографа. Разработанный прибор имеет следующие отличительные достоинства:

- 1) высокоточная система позиционирования, способная обеспечить позиционирование исследуемого объекта с точностью ± 1 мкм;
- 2) полная автоматизация работы рентгеновского микромографа, не требующая вмешательства пользователя в процесс построения 3D-модели исследуемого объекта;
- 3) встроенные алгоритмы: предобработка исходных данных неискажающего сжатия с целью экономии вычислительных ресурсов системы, анализ и классификация внутренней структуры и дефектов объекта;

- 4) 3D-отображение псевдоцветных изображений;
- 5) высокое быстродействие работы как аппаратного, так и программного обеспечения, обусловленное использованием в составе программного обеспечения как аппаратной, так и программной частей рентгеновского микротомографа структурно-перестраиваемых алгоритмов управления, обеспечивающих значительное повышение точности и скорости работы рентгеновского микротомографа.

При анализе аналогичных устройств на рынке было выявлено, что разработанный микротомограф превосходит аналоги. Преимуществами являются мобильность, компактность, возможность диагностировать материалы (органические, неорганические, конструкционные) и элементы радиоэлектронной аппаратуры; возможность работать в комплекте с другим оборудованием, очень низкая цена при качествах, не уступающих конкурентам.

6.6. Интеллектуальные распределенные информационные системы охраны территорий и объектов

Вопросам безопасности человечество всегда уделяло большое внимание. И назначение любой системы охраны (СО) состоит в том, чтобы исключить (а при невозможности – минимизировать) последствия нежелательных воздействий на людей, их имущество, интеллектуальную собственность и другие «объекты» посягательств злоумышленников. А эти воздействия могут быть как осознанными (со стороны враждебной стороны), так и неосознанными – в результате аварий, стихийных бедствий. Исходя из того, что угроза безопасности различной природы и ее целью являются различные объекты, СО конструктивно создают для решения разных задач, применяя наиболее эффективные устройства и принципы: физическое ограждение, контроль доступа, охрану периметра, видеонаблюдение, аудиоконтроль, пожарную безопасность и т.д. Все это может быть интегрировано в единую общую систему охраны. Каждая подсистема будет кратко описана ниже [1–5].

6.6.1. Структурно-функциональная схема системы охраны

Рассмотрим СО в общем виде. СО можно представить как замкнутую систему управления (рис. 6.34).

СО состоит из следующих устройств:

Охраняемая зона – транспортное средство или территория объекта, в которой может (должна) быть обнаружена опасность с помощью системы безопасности.

Охранные датчики – устройства, воспринимающие воздействия на охраняемую зону и передающие информацию на анализирующее и решающее устройство (АРУ).

Блок коммуникации – система, форма и среда передачи данных от датчиков на анализирующее и управляющее устройство (аналоговые или цифровые сигналы, по проводам, оптическому кабелю или радиоканалу).



Рис. 6.34. Структурно-функциональная схема системы охраны

АРУ – принимает и обрабатывает информацию от датчиков. Передает обработанную информацию на интерфейс. В некоторых системах принимает решение о том, что считается допустимым или что превышает установленный порог доверия. Через интерфейс или на-

прямую подает команды на исполнительное устройство. В некоторых схемах добавлено устройство памяти, в котором хранится априорная информация о возможной опасности или эталонные состояния охраняемой зоны (например, в виде порогового значения напряжения, кода, изображения и т.д.).

Исполнительное устройство – может или само воздействовать на внешнюю среду (система пожаротушения, автомобильная сирена, строб-вспышка охранной системы, электрошокер) или управлять устройством оповещения.

Устройство оповещения – служит для передачи тревожной информации силам реагирования.

Силы реагирования (охрана, отряд МЧС и т.п.), непосредственно воздействующие на внешнюю среду с целью минимизации потерь.

Автономный блок питания играет особую роль в системах безопасности. Он обеспечивает работоспособность даже при воздействии со стороны нарушителей на централизованные системы жизнеобеспечения, что важно для устойчивой и надежной работы СО.

Эффективность системы безопасности определяется скоростью ее отработки на внешнее воздействие – для исключения развития событий по неблагоприятному сценарию скорость ответных действий должна быть выше, чем скорость воздействия. С этой целью для торможения действий криминальных элементов используются средства механической укреплённости (сейфы, механические замки, металлические двери, решетки на окнах помещений, устройства блокировки руля и рычага переключения передач автомобиля, стеклоподъемники автомобиля, механические средства защиты от хищения оргтехники и компьютеров и др.). В этом же ряду находятся и средства вандалозащищенности оборудования систем безопасности (специальное крепление, антитапёрные датчики и др.), так как для их нейтрализации злоумышленникам также требуется время. В зависимости от размера, типа и других особенностей охраняемой зоны сами системы имеют различные конструктивные особенности.

6.6.2. Классификация систем охраны

Таким образом, можно классифицировать системы охраны в зависимости от охраняемой зоны и возложенных на нее задач. Наибольшее распространение получили:

- ограждающие конструкции: двери, ворота, шлагбаумы, решетки и т.д.;
- системы контроля и управления доступом (СКУД);
- аудио- и видеодомофоны;
- охранно-пожарная сигнализация;
- охрана периметра;
- досмотровое оборудование и системы предотвращения краж;
- автомобильные сигнализации;
- системы охранного телевидения (видеонаблюдения).

Рассмотрим особенности самых распространенных систем безопасности.

Ограждающие конструкции – самые древние охранные устройства, ограничивающие механически доступ в защищаемые зоны. Этими устройствами управляет человек, который берет на себя функции датчиков и решающего устройства. В современных системах охраны ограждающие конструкции относятся к исполнительным устройствам.

Системы контроля и управления доступом разрешают цивилизованным способом попасть в охраняемое пространство всем, кто имеет право доступа в него. Считыватель системы (охранные датчики) преобразует признаки, вводимые посетителем, в код, а контроллер (анализирующее и решающее устройство) сравнивает полученный код с разрешенными кодами, хранящимися в устройстве памяти. При обнаружении разрешенного кода срабатывает исполнительное устройство (электрозащелка, электрозамок, турникет, шлагбаум, шлюз). К системам управления доступом логично отнести и переговорные (видеопереговорные) системы, в которых указанные выше функции реализуются оператором, хранящим в своей памяти образы «своих» и «чужих».

Аудио- и видеодомофоны, устройство которых можно отнести к СКУД для жилых помещений, являются наиболее простыми и, следовательно, наиболее дешевыми устройствами обеспечения безопасности квартиры, подъезда жилого дома. Основное назначение домофона – это обеспечение возможности переговорить с посетителем перед тем, как принять решение – открыть ему дверь или нет. Обычно конструкция состоит из вызывного устройства (панель на входной двери) и телефона-трубки (аудиодомофон) или устройства с монитором и трубкой (видеодомофон), которые устанавливаются в

квартире (доме). Принцип работы такой системы очень прост – «гость» нажимает кнопку вызова на дверном устройстве, «хозяин» поднимает трубку, разговаривает с ним, после чего идет открывать дверь ключом (или открывает ее дистанционно). При использовании видеодомофона «гость» с помощью видеокамеры или видеопанели виден на мониторе, поэтому их часто относят к системам видеонаблюдения. Домофоны делятся на малоабонентские и многоабонентские.

В охранных и пожарных системах сигнализации роль анализирующих и решающих устройств, устройств памяти выполняют датчики (извещатели). В контрольной панели принимается окончательное решение о наличии тревоги (привлечение внимания охранника или передача сигнала тревоги по телефонной линии, радиоканалу и пр.). Датчики анализируют физическое состояние среды (освещенность, звук, тепло, механическое воздействие, напряженность электромагнитного поля) – их срабатывание трактуется как возгорание или как появление человека в окружающем пространстве). Несовершенство такой модели является источником ложных тревог или пропуска тревожных событий. Охранная сигнализация трактует все распознаваемые воздействия как вторжение и допускает вход в охраняемое пространство только на время снятия его с охраны.

Периметральные системы, по сути, являются разновидностью охранных систем сигнализации с датчиками, созданными для контроля больших открытых пространств.

Досмотровое оборудование оповещает о проносе в контролируемую зону предметов, имеющих признаки запрещенного к проносу (например, оружия). Системы предотвращения краж решают задачу оповещения о несанкционированном выносе товаров из торгового зала. В качестве основания для выработки сигнала тревоги используется наличие на товаре в момент проноса его вблизи антенны специальной бирки. Бирка – «признак» запрета к проносу. Можно сказать, что антикражевые системы по отношению к непроданному товару (и человеку, выносящему его из магазина) реализуют функцию, инверсную функции систем управления доступом.

Автомобильные сигнализации во многом функционируют аналогично системам охранной сигнализации и систем управления доступом. Кроме того, в них реализуется блокировка части функций системы в охраняемом пространстве (например, так называемый иммоби-

лайзер блокирует стартер, зажигание и подачу топлива двигателя). Ложные срабатывания автомобильных сигнализаций во многом являются следствием жестких условий их эксплуатации.

Система охранного телевидения представляет визуализацию информации об охраняемой зоне. В качестве охранного датчика выступает видеочамера, которая формирует видеосигнал. Далее видеосигнал поступает на видеорегистратор, компьютер с системой видеозащиты, монитор пункта охраны (анализирующее и решающее устройство). При угрозе безопасности система или оператор подают команду на исполнительное устройство.

6.6.3. Датчики систем охраны

Датчики движения

Для охраны внутренних помещений наибольшее распространение получили пассивные ИК-датчики движения (рис. 6.35) и совмещенные датчики типа пассивный + микроволновой (рис. 6.36). Совмещенные датчики отличаются гораздо более высокой надежностью и устойчивостью к ложным срабатываниям.



Рис. 6.35. Внешний вид пассивного датчика движения



Рис. 6.36. Внешний вид дуального (комбинированного) датчика движения

Для охраны периметра и помещений используются: активные инфракрасные датчики движения и присутствия; пассивные и дуальные датчики движения; датчики разбития стекла; магнитные датчики; шлейфы.

Пассивные инфракрасные датчики движения срабатывают при попадании движущегося объекта, излучающего тепло (например, человека), в зону чувствительности датчика. Датчики отличаются, в основном, формой зоны чувствительности и устойчивостью к ложным срабатываниям. Зона чувствительности датчиков для систем охранной сигнализации представляет собой сектор (90–110). В техническом описании датчиков приводятся диаграммы, которые наглядно демонстрируют зоны чувствительности датчиков. Диаграмма датчика может быть изменена. В соответствии с расположением датчика и особенностями плана помещения изменить диаграмму можно, используя прилагаемые к датчику сменные линзы Френеля или наклейки, которые перекрывают часть чувствительного элемента датчика.

Недостаток самых простых и дешевых датчиков в том, что они срабатывают при определенной скорости изменения теплового потока. Например, при включении/выключении батареи отопления, на сквозняке, из-за нагрева солнцем определенных поверхностей в помещении и т.д. датчик может сработать. Более совершенные (и более дорогие) датчики не имеют этих недостатков. Их надежность и стойкость к тепловым помехам обеспечиваются многоканальными чувствительными головками и сложной обработкой сигнала в самом датчике. В простых моделях обработка сигналов проводится аналоговыми методами, а в более сложных – цифровыми, например с помощью встроенного процессора.

Датчики разбития стекла

Датчики разбития стекла (рис. 6.37) реагируют на звон бьющегося стекла. Наиболее совершенные модели анализируют спектр звуковых шумов в помещении. Если спектр шума содержит составляющую, совпадающую со спектром повреждаемого стекла, то датчик срабатывает. Один такой датчик может охранять стеклянные окна,



Рис. 6.37. Датчик разбития стекла

витрины и т.п. площадью до 10 м². Двухпороговые датчики регистрируют звук удара по стеклу и звон разбиваемого стекла. Для индикации тревоги такой датчик должен зарегистрировать два соответствующих сигнала с интервалом не более 150 мс. Чувствительность датчиков разбития стекла регулируется с применением имитатора разбивания стекла.

Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрические датчики излучают и принимают отраженный сигнал инфракрасного излучения с длиной волны порядка 1 мкм. Они используются в составе систем защиты внутреннего и внешнего периметра для бесконтактного блокирования пролетов, дверей, лифтов, проемов, коридоров и т.п. Их отличает высокая устойчивость и надежность работы. Фотоэлектрические датчики состоят из двух частей – передатчика и приемника. Они разносятся вдоль линии охраны. Между ними проходит система модулированных инфракрасных лучей (рис. 6.38).

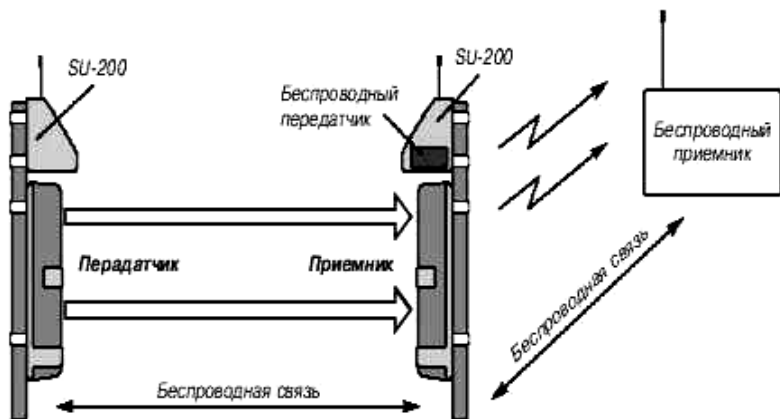


Рис. 6.38. Фотоэлектрические датчики

Датчики этого типа срабатывают при попытке пересечь систему лучей, отличаются высокой устойчивостью и надежностью работы. На рис. 6.39 показаны случаи пересечения барьера, которые различаются фотоэлектрическим датчиком. Наиболее совершенные модели фотоэлектрических датчиков могут работать автономно. Для это-

го они оснащаются солнечными элементами, которые заряжают аккумуляторные батареи датчиков.

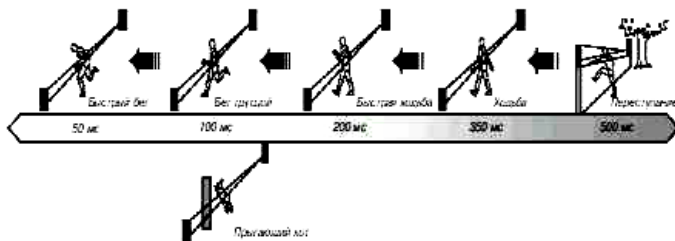


Рис. 6.39. Варианты срабатывания барьерных датчиков

Микроволновые датчики

Микроволновые датчики излучают и принимают отраженный сигнал поля сверхвысокой частоты. В плане охраны внутренних помещений их характеристики аналогичны характеристикам вышеперечисленных устройств, но микроволновые датчики имеют гораздо более высокую стоимость, более низкую устойчивость к ложным срабатываниям, высокий уровень вредных излучений. При охране наружного периметра датчики данной группы проигрывают по своим характеристикам активным ИК-датчикам фотоэлектрического типа.

Ультразвуковые датчики

Ультразвуковые датчики излучают и принимают отраженный сигнал ультразвукового поля. Их отличает: малая чувствительность; высокий уровень ложных срабатываний; зависимость настроек от перепадов температуры, сквозняка, акустических шумов, колебаний влажности. Поэтому этот тип датчиков нашел применение, в основном, в недорогих системах для защиты малых замкнутых изолированных объемов, например салона автомобиля.

Вибродатчики

Вибродатчики реагируют на наличие вибрации и ударов. Работают на основе пьезоэффекта или электромагнитной индукции. Отличаются низкой стоимостью и высоким уровнем ложных срабатываний. Массовое применение находят, в основном, в наиболее дешевых системах автомобильной сигнализации.

Магнитные датчики

Магнитные датчики относятся к самым простым и устанавливаются на окна, двери и люки. Выпускаются двух видов: для наружной и скрытой установки. Обычно размещаются в верхней части двери или окна. С целью повышения надежности устанавливается по два датчика, соединенных последовательно. При установке на окна каждая фрамуга окна защищается парой «геркон + магнит». Магнитные датчики представляют собой пару «геркон плюс магнит» и срабатывают при открытии/закрытии двери или окна. Геркон – это герметически запаянный в стеклянную трубку контакт. Он замыкается или размыкается при поднесении к нему магнита. Обычно магнит крепится к подвижной части двери или окна, а геркон – к неподвижной.

Шлейфы

Шлейфы представляют собой ленту из тонкой алюминиевой фольги. Она клеится на стекло, стену, дверь и т.д. При разрушении основания, на которое она наклеена, лента рвется и разрывает цепь протекания электрического тока. Для подключения к цепи охранной сигнализации лента и проводник зажимаются в держателе, который клеится к тому же основанию, что и лента.

6.6.4. Системы охранного телевидения

Система видеонаблюдения – одна из основных и самых эффективных способов обеспечения безопасности. Поэтому рассмотрим ее более подробно [1–8].

С помощью систем видеонаблюдения возможна реализация наиболее широкого спектра возможностей: непрерывность контроля охраняемых территорий в любое время суток, детекция движения в контролируемых зонах, накопление информации по событию, автоматическое распознавание и сравнение регистрируемой информации с архивом и т.д. Системы видеонаблюдения стали неотъемлемой частью комплекса мер, направленных на обеспечение безопасности жизни и имущества на всевозможных объектах (в том числе и в частных домах и владениях), устанавливаются в общественных местах, на транспорте (в частности, в метро, на вокзалах). Во многих случаях наличие системы видеонаблюдения является обязательным

условием обеспечения безопасности, например на автостоянках, в музеях, магазинах.

Основные типы систем видеонаблюдения: аналоговая система, цифровая система, система на основе сетевых решений, интегрированная система видеонаблюдения, видеодомофоны (также относят к СКУД), аналоговая система.

Аналоговая система состоит из аналоговых видеокамер; коаксиальных линий связи; аналогового мультиплексора или квадратора (принцип действия этих аппаратов цифровой, но его входные и выходные сигналы – аналоговые); аналогового видеомонитора; аналогового видеомагнитофона.

Данная система получается достаточно громоздкой даже для небольших объектов (с числом видеокамер до 4), особенно при необходимости вести непрерывную запись. На сегодняшний день система практически полностью вытеснена цифровыми (гибридными) системами.

Цифровая система (гибридная) состоит из аналоговых видеокамер; коаксиальных линий связи; аналогового мультиплексора, квадратора, цифрового видеопроцессора (на вход цифрового видеопроцессора поступает аналоговый сигнал, на выход – цифровой); цифрового видеорегистратора (регистрация идёт в цифровой форме, независимо от вида входного сигнала), видеорегистратор может иметь встроенный мультиплексор. В качестве головного оборудования может быть использовано компьютерное рабочее место со специальным программным обеспечением и встроенной платой захвата аналогового видеосигнала или цифровых накопителей и обработки видеоизображения (видеорегистраторов). Данная система практически не имеет ограничений по количеству видеокамер (в том числе достаточно удаленных) и применяется на любых объектах.

Система на основе сетевых решений состоит из: видеокамер со встроенным веб-сервером; линий связи по витой паре; сетевого концентратора; компьютерного рабочего места со специальным программным обеспечением.

В основном применяется как местное средство наблюдения за перемещениями внутри отдельно взятого пространства, так как существуют ограничения по длине кабеля от компьютера до видеокамеры.

Интегрированная система видеонаблюдения может быть любого типа, но предполагается, что она программно-аппаратно объединена в единый комплекс с другими системами.

Преимущество систем охранного телевидения по сравнению с другими охранными системами заключается в их высокой информативности (90 % всей информации об окружающем мире человек получает благодаря органам зрения). Проверить правильность функционирования систем безопасности, убедиться в реальности тревоги, выработанной сигнализацией (охранной, пожарной, периметральной, антикражевой, автомобильной), можно не только посещением человеком места происшествия, но и дистанционно – с помощью видеосистемы. А еще важнее предотвратить происшествие, обнаружив опасное движение на подступах к охраняемой зоне, расшифровав возможную угрозу по экрану видеомонитора. Это особенно актуально для удаленных необслуживаемых объектов.

Конечно же, цифровые технологии значительно увеличили функциональность систем видеонаблюдения: потребители получили встроенные программно видеодетекторы, решающие проблемы автоматического охранного видеонаблюдения; электронное увеличение изображения; выборочный просмотр, просмотр по дате, событию; автоматическое определение и запись автомобильных номеров; автоматическую идентификацию личности и т.д.

Однако до сих пор в роли решающего устройства и устройства памяти, как правило, выступает сам человек. Техника только помогает ему принять решение. Органы зрения анализируют визуальную информацию опосредованно, с помощью видеокамер, устройств обработки информации и видеомониторов. Самых видеокамер может быть довольно много, а благодаря современным системам связи они могут быть удалены от оператора.

Естественно, что участие человека в выработке решения, приносит свои проблемы: субъективность человека в оценке происходящего, возможность бессознательного или осознанного игнорирования каких-либо событий или даже саботажа. Кроме того, существуют и физиологические ограничения возможностей человека обрабатывать большой поток информации с минимальными потерями. То есть требуется согласование потока визуальной информации с пропускной способностью информационного канала видеомони-

тор – оператор. Применительно к видеосистемам это выражается выполнением следующих требований:

- соответствующая организация рабочего места оператора (расстояние до экрана видеомонитора, характер освещенности и пр.);
- установление времени переключения видеокамер, не приводящего к утомляемости оператора;
- размещение на экране одновременно такого количества изображений от видеокамер, которые реально могут контролироваться оператором (по требованиям эргономики, не более 6–8).

Уменьшение влияния негативных сторон «человеческого фактора» может быть достигнуто видеозаписью всего происходящего для последующего анализа. Если для этой цели используется видеорегистратор, то он должен иметь блокировку доступа, и желательно, чтобы он находился в специальном сейфе. Вообще говоря, большинство приборов для обработки видеосигналов имеют блокировки доступа, пароли; более того, в самом помещении охраны рекомендуется скрыто устанавливать видеокамеру для записи действий операторов. У французов есть хорошая пословица: «Предают только свои».

Помощь оператору могут оказать соответствующие надписи на экране (особенно ценные при нештатной ситуации), зуммер, сигнализирующий о срабатывании датчика тревоги или об окончании ленты видеомagneитофона, информация о внезапном пропадании видеосигнала или о каком-то движении в контролируемой зоне.

6.6.5. Современные интегрированные системы охраны

В большей мере эффективность систем охраны низка потому, что для их применения необходимы многочисленные высококвалифицированные и постоянно поддерживающие свой уровень специалисты – операторы. Обучение и содержание такого специалиста дорогое и затратное по времени.

Поэтому на сегодняшний день стоит острая потребность в создании систем охраны, способных заменять функции человека; беспристрастно и надежно анализировать ситуацию в зоне охраны; анализировать формы или поведение наблюдаемого объекта, идентифицировать личность; производить автоматическую настройку в зависимости от времени суток, времени года или изменении других признаков; и самое главное – без непосредственного участия чело-

века принимать наилучшие решения по ликвидации угрозы. Одним словом, «интеллектуальные интегрированные системы охраны» (ИИСО).

Основной принцип заключается в определении фактического изменения ситуации. И затем анализ «интеллектуального» блока обычно сводится к принятию решения, что в одном случае считается подозрительным, а в другом – допустимым.

Развитие ИИСО стало возможно с момента появления высокопроизводительных программно-аппаратных комплексов и развития математического аппарата. Базой для построения современных интеллектуальных систем стали устройства (датчики, исполнительные устройства), имеющие возможность совместной работы с персональным компьютером.

Рассмотрим самые популярные на сегодняшний день ИИСО. Их основное преимущество перед другими СО в способности не только обнаружить угрозу, но и идентифицировать ее. Именно это позволяет принимать правильные решения.

Из табл. 6.2 видно, что многие современные системы охраны способны установить личность человека по телевизионному изображению (лица, отпечатки пальцев), оценить состав выдыхаемого газа. Вместе с этим системы охраны имеют основной серьезный недостаток: нестабильность установить личность человека (террориста) в случае выполнения им (человеком) специальных маскировочных операций (например, изменения характерных признаков лица). Указанный недостаток значительно уменьшает область применения таких охранных систем.

Т а б л и ц а 6.2

Сравнительные характеристики систем охраны

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
1	Интегрированная интеллектуальная система охраны (ИИСО), г. Томск	Автоматическая (и автоматизированная) интегрированная система охраны объектов путем комплексного распознавания личности человека: лица, силуэта, отпечатков пальцев, голоса и выдыхае-	Система анализа изображения человека, система анализа выдыхаемого газа человека, система анализа голоса человека, программное обеспечение

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		мого газа; общая вероятность корректного распознавания человека 0,999; преимущества: распознавание человека по интегральной оценке	
2	Система видеонаблюдения на базе оборудования НПО «Дивиком»	Система видеонаблюдения, позволяющая производить непосредственный видеоконтроль объекта, а также запись видеосигнала в архив сервера	Сервер, плата видеозахвата + ПО, камеры видеонаблюдения
3	Комплексная система охраны для офиса на базе системы «VideoNet»	Комплексная система охраны офисного помещения на базе аппаратно-программного комплекса «VideoNet», система включает в себя систему видеонаблюдения, систему охранной сигнализации и систему контроля доступа. Программное обеспечение «VideoNet» позволяет добиться высокотонкого конфигурирования и взаимодействия системы в целом и всем подсистемам работать в едином комплексе. Система охранной сигнализации дублируется приемоконтрольным прибором, что значительно повышает надежность системы в случаях проблем с электропитанием и проблем с сервером и позволяет системе охранной сигнализации работать в автономном режиме	Сервер, аппаратно-программный комплекс VideoNet RO5 – Light(SE) – две платы + ПО, домофон, камеры видеонаблюдения, приемоконтрольный прибор, охранные датчики, блоки бесперебойного питания
4	Система идентификации личности по изображению «Face-интеллект», ком-	«Face-интеллект» – автоматизированная система видеозахвата и идентификации личности по изображению	Сервер, программный комплекс + дополнительное ПО (модуль распознавания лиц

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
	пания IVT, г. Москва	<p>лица человека. «Face-интеллект» сканирует и «запоминает» лица всех людей, проходящих мимо видеокамеры, определяет идентичность входных данных, представляющих собой изображения лица человека, осуществляет анализ, инвариантный синтез образа объекта, сравнение с базой данных и распознавание.</p> <p>Тех. характеристики: Скорость обработки изображений, режим кодирования 0,26 с. Режим сравнения 913 000 изобр. в секунду. Результатом работы системы является коэффициент схожести от 0 до 1.</p> <p>Характеристики при пороге распознавания 0,58: Вероятность ложной идентификации 1,4E – 03 %. Вероятность неидентификации в автоматическом режиме 22,6 %. Вероятность неидентификации в экспертном режиме (база данных > 2 500 000 изображений) 7,4 %.</p> <p>Устойчивость идентификации: при поворотах головы; при наличии/отсутствии усов, бороды, очков, при изменении прически; при возрастных изменениях; при различных условиях съемки (яркость, контрастность,</p>	«Face-интеллект» на систему, до 50 чел. в базе)

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		освещение, различный фон). Система «Face-интеллект» является модулем системы безопасности «Интеллект», производимой той же компанией	
5	Распределенная система видеонаблюдения и идентификации объектов «Лик», г. Томск	<p>Описание На основе морфологического анализа изображений разработаны новые методы надежного выделения формы изображения и идентификации изображений с использованием интегральных характеристик формы. В качестве системы регистрации изображения объекта могут использоваться любые видеосъемки (в том числе аналоговые и цифровые камеры). Разработанная система коммутации позволяет одновременно обслуживать до восьми объектов на один коммутатор.</p> <p>Технические характеристики: – точность распознавания не менее 90 %; – время распознавания (независимо от объема базы) не более 0,2 с; – изменение прически, наличие бороды, усов и очков на точность распознавания не влияет; – допустимый поворот изображения 5 град; – количество каналов – 8</p>	<p>Процессор (компьютер) идентификации, предназначенный для хранения и модификации базы данных эталонных изображений и распознавания: – система ввода и коммутации сигналов с видеодатчиков; – система формирования и коммутации управляющих воздействий на исполнительные механизмы; – сеть передачи данных; – линии связи между элементами системы; – программное обеспечение</p>
6	Система для идентификации личности	VIS – программный пакет для автоматической тексто-	Программное обеспечение

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
	по голосу VIS	<p>независимой идентификации по голосу, основанный на долговременном усреднении параметров речи. Цели данной разработки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – использование компьютера для автоматической сегментации речевого сигнала и автоматического измерения параметров; – повышение надежности идентификации за счет комплексного анализа речевого сигнала; – уменьшение субъективности эксперта и времени проведения экспертизы за счет автоматической обработки информации. <p>Эксперименты по идентификации, проведенные с собранной базой данных речевых сигналов, дали 92 % правильных решений</p>	
7	Аппаратно-программный комплекс VOCORD-VoiceID, Россия, компания VOCORD	<p>Аппаратно-программный комплекс VOCORD VoiceID предназначен для решения задач голосовой аутентификации и идентификации по фонограммам произвольного содержания.</p> <p>VOCORD VoiceID применяется в работе центров обработки вызовов (ЦОВ) и диспетчерских центров для повышения качества обслуживания клиентов, а также для решения задач повышения безопасности. Другое применение – в работе пра-</p>	<p>Система поставляется в виде аппаратной платформы, на которой установлены операционная система Windows XP и прикладное программное обеспечение, реализующее функциональность VOCORD VoiceID</p>

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, техни- ческие характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		<p>воохранительных органов. Аутентификация – это проверка соответствия голоса личности эталонным аудиоданным. Идентификация – это установление (опознание) голоса личности по базе эталонных аудиоданных (выбор одного наиболее вероятного из списка эталонов).</p> <p>Особенности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Распределенная архитектура системы – сервера идентификации, АРМ оператора системы могут быть размещены на различных компьютерах, отдельно от основной системы VOCORD Phobos. Связь между серверами VOCORD VoicelD, VOCORD Phobos и АРМ оператора производится по протоколу TCP/IP (через локальную сеть или Интернет). – Адаптация аудиоданных, записанных с разных источников, в системе может производиться в статическом или динамическом режимах. В статическом режиме используется специальный файл адаптации, в котором записан шум, характерный для определенной линии. В динамическом режиме используется специальный алгоритм отстройки от шумов линии. – Положение распознаваемого фрагмента записи 	

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		<p>может быть настроено пользователем. Это позволяет исключить из обработки нежелательные фрагменты (например, музыкальные вставки в начале или конце записи).</p> <ul style="list-style-type: none"> – В системе поддерживается многоуровневое разграничение прав доступа. – Аутентификация пользователей может производиться как в базе данных (SQL-идентификация), так и с использованием контроллера домена на базе Microsoft Active Directory (Windows-идентификация) 	
8	Модуль лазерного капнографа, Россия, «Тритон-ЭлектроникС»	<p>Капнограф предприятия «Тритон-ЭлектроникС» для измерения концентрации CO₂ использует инфракрасную спектроскопию.</p> <p>Лазерный датчик капнографа имеет ряд преимуществ перед традиционными системами капнографов. Использование лазера позволяет исключить движущиеся механические элементы в конструкции датчика, что положительно сказывается на точности и надежности измерений. Каждый экземпляр датчика калибруется эталонными смесями газов. За счет использования оригинальной схемы измерения концентрации прибор не нуждается в периодических калиб-</p>	Модуль лазерного капнографа

№ п/п	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		ровках. Калибровка прибора не нарушается со временем и от различных воздействий на датчик (температура, загрязнение измерительной кюветы и оптических элементов). Малый объем измерительной кюветы позволил уменьшить поток пробы до 50–100 мл/мин	

Устранить (уменьшить) указанный недостаток можно только применением интегрированных интеллектуальных систем охраны, анализирующих цветные телевизионные изображения лица, его силуэта, отпечатков пальцев, выдыхаемого газа и голоса.

Кардинальное отличие ИИСО от уже существующих аналогов состоит в том, что идентификация человека происходит одновременно по нескольким признакам, таким как телевизионное изображение лица, силуэта лица, отпечаткам пальцев, выдыхаемому газу, голосу, и на основании этих параметров, сопоставляя их с данными базы данных, ИИСО формирует интегральную оценку личности.

Задачей ИИСО является определение (распознавание) конкретного человека на основе вычисления оценки:

$$V = \arg \exp R(F_1, F_2(V)),$$

где R – мера близости текущего изображения и эталонного изображения (ЭИ). ТИ и ЭИ представляют собой интегрированные изображения (текущая эталонная информация), синтезированные на основе датчиков информации о человеке: телевизионные трехмерные цветные изображения лица человека и его силуэта, изображения отпечатков рук, выдыхаемого газа и голоса человека. ЭИ человека хранится в памяти ИИСО, а ТИ считывается датчиками информации и соответствует состоянию параметров человека в данный момент времени.

На рис. 6.40 представлена структурная схема ИИСО.

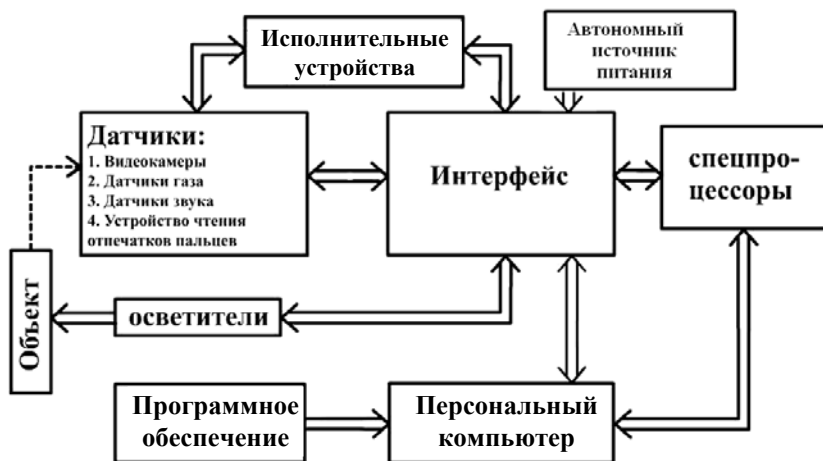


Рис. 6.40. Структурная схема ИИСО

ИИСО состоит из следующих подсистем:

– Видеосистемы считывания и анализа изображений различных размерностей и цветностей, включая телевизионные инфракрасные датчики изображений.

– Газоанализатора, основанного на анализе физико-химических процессов, относящегося к классу многокомпонентных и многоканальных систем.

– Анализатора голоса, включающего блок ввода и распознавания речевой информации.

Новизна ИИСО заключается в использовании следующих подходов:

1. Новый принцип обработки информации в интегрированных интеллектуальных охранных системах, использующих несколько информационных каналов, заключающийся в том, что в функциональную структуру вводятся перестраиваемые вычислительные среды, способные, не создавая сложностей в организации связей в системе, использовать единую информацию о текущем состоянии человека, получаемую по различным информационным каналам.

2. Интеграция таких средств сбора и анализа информации, как телевизионные датчики различных размерностей и цветностей, газоанализатор и анализаторы звука (голоса).

3. Высоконадежный и быстродействующий способ распознавания личности человека путем анализа интегральной информации (цветное объемное изображение лица, силуэта человека, его отпечатков пальцев, выдыхаемого газа и голоса), основанной на модифицированных корреляционных, Фурье- и вейвлет-алгоритмах, использующих структурные и цветные признаки.

Для повышения надежности ИИСО в условиях нестабильного энергопитания разработано устройство обеспечения энергонезависимым источником питания от солнечных энергетических систем. Данные системы позволяют обеспечить стабильное питание ИИСО.

Предлагаемый продукт подразумевает устойчивую идентификацию объекта по интегральной оценке многих параметров, конечный результат его корректной идентификации составляет порядка 99,999 %. Также ИИСО легко интегрируется в уже разработанные системы охраны/безопасности и работает с ними в едином комплексе. ИИСО позволяет решить стоящую проблему идентификации личности и тем самым значительно повысить уровень безопасности там, где это требуется.

Направление развития интегрированных интеллектуальных систем охраны в различных сферах обеспечения безопасности является очень актуальным и перспективным в современных условиях России из-за недостатка подобных разработок отечественного производства и дороговизны импортных аналогов, а также от необходимости развития инновационно-ориентированной экономики. Сравнительные характеристики систем охраны были приведены в табл. 6.2.

С целью повышения качества будут проводиться работы по улучшению характеристик интегрированной интеллектуальной системы охраны, а также по снижению ее конечной стоимости путем совершенствования ее отдельных частей и механизмов; доработке и совершенствованию программного обеспечения, работающего с аппаратной частью ИИСО; внесению доработок, связанных с выявлением неучтенных специфических помех и путей обхода системы. Все это позволит сделать систему максимально надежной и приблизить качество ее работы к единице независимо от того, каким образом будут производиться попытки обхода системы.

Тесты к главе 6

1. В чем заключается новизна ИНМТДС?
 - а) В структурной реализации ИК, позволяющей комплектовать медицинскую систему на стационарном персональном компьютере или на ноутбуке, включаемых в информационную сеть клиники.
 - б) В наличии медицинского инструмента с устройством подсветки и источником питания.
 - в) В алгоритмическом и программном обеспечении диагностических систем.
 - г) В автоматизации диагностики.

2. В программной реализации алгоритма поиска границ бликов, при определении «активных» точек используется соотношение:
 - а) $(p-p_{i-1}) < (p_{i-1}-p_{i-2})$.
 - б) $(p-p_{i-1}) \geq (p_{i-1}-p_{i-2})$.
 - в) $(L_i-p_{i-2}) \geq (L_{i-1}-p_{i-2})$.

3. Какого режима работы не имеет электронный диск памяти?
 - а) Регенерации.
 - б) Выделения границ кадра изображения.
 - в) Чтения информации в микроЭВМ.

4. В цветовой модели L^*a^*b какой канал хранит яркость точки?
 - а) Канал L.
 - б) Канал a.
 - в) Канал b.

5. Основной недостаток метода нормированного размаха:
 - а) Замена двухмерного изображения набором некоторых временных рядов с последующим их усреднением.
 - б) Вычисление R/S для каждой выборки.
 - в) Расчет длины профиля каждой строки.

6. Какова особенность получения информации в системе со сканирующим подсветом?
 - а) Система формирует модель внешней среды в результате обработки двух телевизионных изображений, получаемых одновременно.
 - б) В каждой базисной плоскости находится изображение лишь одной подсвечиваемой точки наблюдения поверхности.
 - в) Число измеряемых точек соответствует числу строк приемного устройства.

7. Телевизионная ИС не содержит:
- Блок обработки видеосигнала.
 - Блок обработки информации.
 - Генератор тактовых импульсов.
8. В ИНМТДС используются следующие информативные признаки изображения внутренних органов:
- Геометрические характеристики (площадь, периметр).
 - Цвет (оттенки).
 - Вес (г, мг).
9. Со сколькими уровнями иерархии должна проектироваться современная медицинская система для выполнения манипуляций на мягких тканях?
- 3.
 - 2.
 - 1.
10. Сглаженное изображение получают, используя общую формулу:
- $$g(x, y) = \frac{1}{P_{(n, m) \in S}} \sum f(n, m).$$
 - $$\psi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \psi(t).$$
 - $$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min(t, \tau).$$
11. В формуле $\psi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \psi(t)$, что означает ψ_τ ?
- Количество учитываемых отрезков в промежутке.
 - Среднюю яркость в рассматриваемом отрезке.
 - Общее число точек в окрестности.
12. В состав буферного запоминающего устройства не входит:
- Блок предварительной обработки.
 - Синхронизатор.
 - Формирователь сигналов управления памятью.
13. Предназначение ИС:
- Обнаружение и определение положения малоконтрольных объектов произвольной формы на плоскости путем корреляционного сопоставления с эталоном.

б) Создание высокопроизводительных технологических уловок для автоматического нахождения дефектов.

в) Разработка технических средств для автоматизации маркирования дефектов участков.

14. Главный недостаток метода пирамидального преобразования:

а) При сжатии исходного изображения возникает погрешность, которая тем больше, чем больше коэффициент сжатия.

б) Необходимость изготовления специальных объективов для приемного устройства со встроенными узкополосными фильтрами.

в) Ограничение по плотности измеряемых точек на поверхности.

15. Какие из следующих операций не входят в основные операции обработки изображения?

а) Корреляция, свертка, вычисление статистических характеристик.

б) Анализ связности, определение геометрических параметров объектов, маркировка их в соответствии с заданным критерием.

в) Построение параллаксграмм и их анализ.

г) Запись информации на микроЭВМ.

Контрольные вопросы к главе 6

1. Перечислите примеры применения информационных систем в мехатронике.

2. Представьте структурную схему и поясните алгоритм интеллектуальной медицинской оптико-телевизионной диагностической системы.

3. Поясните состав программного обеспечения систем технического зрения.

4. Представьте структурную схему и алгоритм работы оптико-телевизионной информационной системы.

5. Объясните корреляционный и фрактальный алгоритмы диагностики материалов.

6. Представьте структурную схему информационной системы и алгоритм работы медицинского микроробота.

7. Поясните принцип действия информационной системы медицинского наноробота.

8. Приведите примеры медицинских массажных мехатронных систем.

9. Представьте структурные схемы светолокационных систем; поясните алгоритм работы стереосистем технического зрения.

10. Поясните принцип действия систем технического зрения для контроля полупроводниковых изделий, печатных плат, фотосаблонов и символов.

11. В чем отличие систем технического зрения контроля стрелочных приборов от систем технического зрения, используемых в гибких производственных модулях сварки, сборки и механообработки?

12. Поясните принципы действия систем технического зрения для контроля объектов в рабочей зоне робота и автоматизации хлопкоуборочных процессов.
13. Представьте алгоритм работы систем технического зрения для контроля распределения температуры на поверхности, контроля параметров оптических деталей и раскроя материала.
14. Поясните принцип действия информационных линеек и полей.
15. Приведите примеры комплектации современных цифровых систем технического зрения.
16. Опишите структурно-функциональную схему интегрированных систем охраны.
17. Поясните цель и принципы действия интегрированных систем охраны.
18. Обоснуйте применение различных датчиков в системах охраны.

Список литературы к главе 6

1. *Системы технического зрения: справочник* / В.И. Сыряжкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенко и др. / под общ. ред. В.И. Сыряжкина, В.С. Титова. Томск, 1992. 367 с.
2. *Мошкин В.И. и др.* Техническое зрение роботов. М. : Машиностроение, 1990. 272 с.
3. *Гедзберг Ю.М.* Охранное телевидение. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 312 с.
4. *Малюк А.А.* Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации: учеб. пособие. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 280 с.
5. *Магауенов Р.Г.* Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. 368 с.
6. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. Томск, 2006. 288 с.
7. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. Томск, 2007. 192 с.
8. *Фрайден Дж.* Современные датчики: справочник. М.: Техносфера, 2005. 587 с.
9. *Керниган Б.В., Ритчи Д., Фьюэр А.* Язык программирования Си. М.: Финансы и статистика, 1985.
10. *Ваулин А.С.* Языки программирования. Кн. 5. М., 1993.
11. *Першиков В.И., Савинков В.М.* Толковый словарь по информатике. М.: Финансы и статистика, 1991. 543 с.
12. *Хантер Робин.* Основные концепции компиляторов = The Essence of Compilers. М.: Вильямс, 2002.
13. *Теоретический материал: Классификация языков программирования.* URL: <http://www.excode.ru/art6213p1.html>, свободный.
14. *Сыряжкин В.И.* Современные методы исследования материалов и нанотехнологий (лабораторный практикум): учеб. пособие. Томск, 2013. 412 с.

ЛИТЕРАТУРА

Justin J. Crom BASIC Face-off // PC Tech Journal. September 1987. P. 136. (Пер.: В.Н. Лопухов)

Богомолов Е.Н., Бубенчиков М.А., Жданов Д.С. и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий: учеб. пособие (лабораторный практикум) / под ред. В.И. Сырямкина. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 412 с.

Ватолин Д.С. Алгоритмы сжатия изображений: метод. пособие. М., 1999.

Ватолин Д.С. Применение фракталов в машинной графике // ComputerWorld-Россия. 1995. № 15. 12 дек.

Ваулин А.С. Языки программирования. М., 1993. Кн. 5.

Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.

Гедзберг Ю.М. Охранное телевидение. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 312 с.

Глушков В.М., Капитанова Ю.В., Мищенко А.Т. Логическое проектирование дискретных устройств. Киев: Наук. думка, 1987. 264 с.

Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 366 с.

Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Давидов М.И., Антонов В.Г. LEX-генератор программ лексического анализа. М., 1985.

Дмитриев С.П. и др. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004.

Золотарев В.В. Основы автоматизации. М., 1978. Ч. 1.

Зубарев Ю.Б., Дворкович В.П., Неченаев В.В., Соколов А.Ю. Методы анализа и компенсации движения в динамических изображениях // Электросвязь. 1998. № 11. С. 15–21.

Изоткина Н.Ю., Осипов Ю.М., Сырямкин В.И. Инновационные технологии управления в мехатронике и робототехнике: учеб. пособие / под общ. ред. Ю.М. Осипова. Томск: Изд. Дом ТГУ, 2015. 220 с.

Касвандс Э.Г. Введение в программирование на языке Ассемблер. М., 1982. Ч. 1.

Керниган Б.В., Ритчи Д., Фьюэр А. Язык программирования Си. М.: Финансы и статистика, 1985.

Комплекс общепромышленных руководящих методических материалов по созданию АСУ и САПР. М.: Статистика, 1980. 119 с.

Кориков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С. Корреляционные системы роботов. Томск: Радио и связь, 1990. 264 с.

Кулешов В.И. и др. Дистанционно-управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.

Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. 368 с.

Малюк А.А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации: учеб. пособие. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 280 с.

Малютин Э.А., Малютина Л.В. Языки программирования. М., 1982.

Моисеева Н.К., Карпунин М.Г. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988. 192 с.

Мошин В.И. и др. Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

Нейронаука для медицины и психологии: 12-й Международный междисциплинарный конгресс. Судак, Крым, Россия, 5–11 июня 2016 г.: Труды конгресса. М.: МАКС Пресс, 2016. 494 с.

Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. 311 с.

Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений (ГОСТ 8ю009–84). М.: Изд-во стандартов, 1985. 150 с.

Обзор рентгеновских микротомографов. 2014. URL: <http://www.bruker.com/ru/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-micro-ct/skyscan-1173/overview.html>

Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; под ред. Е.М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.

Патент на изобретение RU 2505800. Способ рентгеновской томографии и устройство для его осуществления / Сырямкин В.И. и др. 27.01.2014. Бюл. № 3.

Перспективные системы и задачи управления : матер. Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Седьмой молодёжной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов н/Д: ЮФУ, 2016. Т. 1. 463 с. Т. 2. 376 с.

Попов Э.В., Фридман Г.Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1976. 456 с.

Претт У. Цифровая обработка изображений: пер с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.

Скорняков Э.П., Шведова В.В., Мельникова Л.И. Оценка технического уровня продукции – необходимое условие выхода на рынок: учеб. пособие. М., 1993. 88 с.

Солопченко Г.Н. Метрология, стандартизация и сертификация: курс лекций. URL: http://www.iit.spb.ru/2005/ins_inn_material/baza_0/

Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.

Сырямкин В.И. и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 410 с.

Сырямкин В.И., Титов В.С. и др. Системы технического зрения: справочник / под ред. В.И. Сырямкина и В.С. Титова. Томск: РАСКО, 1992. 367 с.

Терренс П. Языки программирования: разработка и реализация. М., 1979.

Технологии обработки изображений при медицинских и геофизических исследованиях: вводный обзор. Synergies in geophysical, medical, and space imaging: overview and introductory session / Stolt Robert H. // Leading Edge. 2002. Vol. 21, № 6. P. 578–580.

Тимофеев В.А. Роботы и искусственный интеллект. М.: Наука, 1978, 192 с.

Титов В.С., Сырямкин В.И., Ширабакина Т.А. Техничко-экономический анализ разработки средств визуального контроля: учеб. пособие. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1995. 98 с.

Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 477 с.

Узлевецкий В.А. Передача, обработка и воспроизведение цветных изображений. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.

Ушкова В. Новые языки программирования и тенденции их развития. М., 1982.

Хвощ С.Т., Варлинский Н.Н., Попов Е.А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 640 с.

Хротко Г. Языки программирования высокого уровня. М., 1982.

Хьювенен Э., Септенен Й. Мир Лиспа. М., 1990. Т. 1.

Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. Томск, 2006. 288 с.

Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. Томск, 2007. 192 с.

Энциклопедия кибернетики. Киев: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. Т. 1, 2. 608 с.

Янг С. Алгоритмические языки реального времени. М., 1985.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. Робототехника, мехатроника, информационные устройства и системы	5
2. Принципы построения информационных устройств и систем	11
3. Бионические основы информационных устройств и систем	15
4. Рекомендации применения информационных устройств и систем	19
<i>Тесты к введению</i>	23
<i>Контрольные вопросы к введению</i>	23
<i>Список литературы к введению</i>	24

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

1.1. Введение	25
1.2. Общие сведения из теории информации	25
1.3. Понятие сигнала. Классы и типы сигналов	28
1.4. Общая модель информационной системы	35
1.4.1. Системы связи	39
1.4.2. Системы хранения информации	44
1.4.3. Преобразователи информации	45
1.4.4. Другие типы информационных систем	47
1.5. Классификация информационных систем	48
<i>Тесты к главе 1</i>	50
<i>Контрольные вопросы к главе 1</i>	53
<i>Список литературы к главе 1</i>	53

Глава 2. ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ

2.1. Введение	54
2.2. Осветители рабочей зоны	54
2.3. Оптико-электронные приемники излучения	59
2.4. Телевизионные камеры	82
2.5. Видеопроцессоры	84
2.6. Буферные запоминающие устройства	99
2.7. Электронные диски памяти	108
2.8. Датчики очувствления	110
2.8.1. Индуктивные датчики	110
2.8.2. Датчики Холла	112
2.8.3. Емкостные датчики	114
2.8.4. Ультразвуковые датчики	116
2.8.5. Оптические датчики измерения в ближней зоне	118

2.8.6. Тактильные датчики.....	119
2.8.7. Дискретные пороговые датчики.....	120
2.8.8. Аналоговые датчики	121
2.8.9. Элементы датчика схвата, встроенного в запястье	127
2.8.10. Внутренние датчики информации о состоянии рабочих органов робота	128
2.8.11. Пример применения датчиков информации в роботах	132
<i>Тесты к главе 2.....</i>	134
<i>Контрольные вопросы к главе 2.....</i>	137
<i>Список литературы к главе 2.....</i>	138

Глава 3. СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

3.1. Системы технического зрения роботов как разновидность информационных систем мехатроники	139
3.1.1. Общие сведения о системах технического зрения (СТЗ).....	139
3.1.2. Классификация СТЗ	140
3.1.3. Обобщенная структурная схема СТЗ	145
3.1.4. Требования, предъявляемые к СТЗ.....	146
3.1.5. Погрешности, обусловленные условиями эксплуатации СТЗ	151
3.1.5.1. Погрешности, вызванные ориентацией датчика текущего изображения относительно объекта в рабочей зоне	151
3.1.5.2. Погрешности, вызванные неравномерностью освещенности объекта в рабочей зоне	162
3.1.6. Погрешности, вызванные ошибками установки датчика текущего изображения	166
3.2. Алгоритмы обработки зрительной информации в СТЗ	169
3.2.1. Обобщенный алгоритм обработки зрительной информации	169
3.2.2. Формирование изображений	171
3.2.3. Предварительная обработка изображений	176
3.2.4. Сегментация изображений	184
3.2.5. Описание изображений.....	192
3.2.6. Анализ изображений	204
3.2.7. Алгоритмы анализа объемных цветных изображений.....	205
3.3. Применение структурно-перестраиваемых вычислительных сред в процессе обработки информации	219
3.4. Применение нейронечеткого алгоритма для распознавания образов	227
3.4.1. Постановка задачи.....	228
3.4.2. Алгоритм распознавания образов на основе нейронечетких портретов	231

3.4.3. Извлечение знаний в виде интегральных характеристик классов образов	231
3.4.4. Построение нейронечеткой системы распознавания образов	232
3.4.5. Адаптация и контроль качества алгоритма	234
<i>Тесты к главе 3</i>	236
<i>Контрольные вопросы к главе 3</i>	237
<i>Список литературы к главе 3</i>	238

Глава 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

4.1. Введение	240
4.2. Общие сведения о метрологическом обеспечении ИУС	242
4.3. Метрологические характеристики информационных систем	243
4.4. Погрешности информационных устройств и систем	247
4.4.1. Общие сведения о погрешностях измерений	247
4.4.2. Виды распределений случайных величин	249
4.4.2.1. Равномерное распределение	249
4.4.2.2. Нормальное распределение	250
4.4.2.3. Экспоненциальное распределение	253
4.4.3. Классификация погрешностей	254
4.4.4. Оценка статистических характеристик погрешностей ИУС	258
4.5. Метрология программного обеспечения информационных устройств и систем	266
4.5.1. Классификация критерия качества программного обеспечения	267
4.5.2. Основные требования и критерии качества программного обеспечения	269
4.5.3. Связь критериев и характеристик программного обеспечения	269
4.5.4. Сложность. Оценка предела возможностей вычисления способом Бреммермана	270
4.5.5. Метрики качества программ	271
4.6. Основные этапы измерительных технологий	277
4.7. Поверка информационных устройств и систем	279
4.8. Контроль и диагностика информационных устройств и систем	285
4.8.1. Отказы и надежность информационных систем	285
4.8.2. Особенности контроля и диагностики информационных систем	293
Заключение	299
<i>Тесты к главе 4</i>	299
<i>Контрольные вопросы к главе 4</i>	302
<i>Список литературы к главе 4</i>	303

**Глава 5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ**

5.1. Введение	304
5.2. Структура САПР информационных устройств и систем.....	305
5.3. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания ИУС	319
5.3.1. Функционально-стоимостный анализ на ранних этапах научно-исследовательской работы	321
5.3.2. ФСА на основных этапах научно-исследовательской работы	328
5.3.3. Функционально-стоимостный анализ при оптимизации структуры ИУС	334
5.3.4. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании ИУС	343
5.3.4.1. Выбор способа контроля качества изделий на основе метода расстановки приоритетов.....	343
5.3.4.2. Предварительный выбор элементов структуры ИУС на основе экспресс-ФСА	345
5.3.4.3. Выбор оптимального варианта структуры элементов ИУС.....	350
5.4. Параметрический синтез ИУС на примере систем технического зрения	356
5.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию СТЗ	356
5.4.2. Инженерный (приближенный) расчет СТЗ.....	360
5.4.2.1. Расчет емкости памяти ИС.....	360
5.4.2.2. Оценка быстродействия ИУС	366
5.4.2.3. Методика расчета ИУС	376
5.5. Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для моделирования, проектирования и настройки систем технического зрения	377
5.5.1. Состав аппаратно-программного комплекса	377
5.5.2. Алгоритмы программного обеспечения для информационных систем в робототехнике и мехатронике	381
5.5.3. Программное обеспечение для информационных устройств и систем робототехники и мехатроники	385
5.5.4. Языки программирования информационных устройств и систем.....	394
5.5.4.1. Интерпретаторы	396
5.5.4.2. Компиляторы.....	397
5.5.5. Классификация языков программирования	398
<i>Тесты к главе 5.....</i>	<i>409</i>
<i>Контрольные вопросы к главе 5.....</i>	<i>412</i>
<i>Список литературы к главе 5</i>	<i>413</i>

Глава 6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

6.1. Введение	415
6.2. Информационные системы микро- и мини-роботов	415
6.3. Медицинские информационные системы	424
6.3.1. Интеллектуальная медицинская оптико-телевизионная диагностическая система	424
6.3.2. Интеллектуальная мехатронная система контроля внутривенной процедуры инфузии	433
6.3.3. Информационные системы медицинских микророботов	439
6.3.3.1. Деятельность хирурга – оператора мини-робота	444
6.3.3.2. Эргономические требования к хирургическому мини-роботу	447
6.3.3.3. Информационные системы медицинских нанороботов	450
6.3.4. Мехатронная система для манипуляций на мягких тканях	453
6.4. Информационные системы в комплексах технической диагностики	460
6.4.1. Диагностика материалов оптико-телевизионными измерительными системами	460
6.4.2. Оптико-телевизионная система для диагностики материалов	462
6.4.3. Методы измерения значения фрактальной размерности. Метод нормированного размаха	468
6.4.4. Метод серии изображений	470
6.4.5. Корреляционные статистические алгоритмы	471
6.5. Цифровая рентгеновская 3D-микротомография	475
6.6. Интеллектуальные распределенные информационные системы охраны территорий и объектов	488
6.6.1. Структурно-функциональная схема системы охраны	489
6.6.2. Классификация систем охраны	490
6.6.3. Датчики систем охраны	493
6.6.4. Системы охранного телевидения	497
6.6.5. Современные интегрированные системы охраны	500
Тесты к главе 6	511
Контрольные вопросы к главе 6	513
Список литературы к главе 6	514
ЛИТЕРАТУРА	515

Учебное издание

СЫРЯМКИН Владимир Иванович

ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ
В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ

Серия: Интеллектуальные технические системы

Учебное пособие

Редактор *В.Г. Лихачева*
Компьютерная верстка *Г.П. Орловой*

Подписано в печать 27.10.2016 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Печ. л. 32,8; усл. печ. л. 30,5; уч.-изд. л. 30,3.

Тираж 100 экз. Заказ

ООО «Издательство ТГУ», 634029, г. Томск, ул. Никитина, 4
ИП Завгородний Е.А., 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 28, стр. 1