

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**В.И. Сырямкин, И.Н. Рожнёв**

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В МЕХАТРОНИКЕ**

Учебное пособие

Под редакцией В.И. Сырямкина

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК  
ББК  
С

**Сырямкин В.И.**

С Информационные системы в мехатронике: учебное пособие / В.И. Сырямкин, И.Н. Рожнёв; под ред. В.И. Сырямкина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 440 с.

Предлагаемое читателю учебное пособие включает в себя систематизированные сведения об информационных системах (ИС) в мехатронике: рассмотрены общие вопросы об информации, даны понятия меры, объёма, обработки, передачи и хранения информации. Даны сведения о метрологическом обеспечении ИС, приведены метрологические характеристики, погрешности, контроль и диагностика ИС. Подробно описаны внешние и внутренние датчики робототехнических систем, а также системы технического зрения как разновидность ИС; приведены примеры применения ИС. Подробно рассмотрена САПР ИС на примере корреляционных систем технического зрения.

Книга предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей университета. Она может быть использована при разработке и проектировании ИС работниками других вузов и инженерно-техническими сотрудниками НИИ и предприятий.

УДК  
ББК

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета.

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор  
*В.И. Гончаров*

Доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор  
*Ю.М. Осипов*

Кандидат технических наук, доцент  
*В.С. Шидловский*

© Сырямкин В.И., Рожнёв И.Н., 2008  
© Томский политехнический университет,  
2008  
© Издательство ТПУ, оформление, 2008

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Информационные системы (ИС) находят все более широкое применение в различных сферах восприятия, обработки и хранения информации. Особый интерес представляет использование ИС в мехатронике, стремительно развивающейся в последнее время.

Состав включенного в учебное пособие материала, его композиция были predetermined желанием по возможности привести все те сведения, которые необходимы студентам, аспирантам, инженерам, преподавателям и исследователям, занимающихся изучением, разработкой и эксплуатацией ИС, используемых в мехатронике. В книге подробно рассмотрены общие сведения об ИС, метрологическое обеспечение и проектирование ИС. Особое внимание уделено вариантам ИС, широко используемых в мехатронике, системам технического зрения (СТЗ). Представлено алгоритмическое и программное обеспечение СТЗ, описаны варианты реализации СТЗ.

Работа над данным учебным пособием была распределена среди соавторов следующим образом: раздел 5 и подразделы 2.1–2.3, 2.7–2.9, 3.1, 4.1–4.4, 6.1, 6.6 написаны В.И. Сырямкиным; раздел 1 и подраздел 3.2 – И.Н. Рожневым. Кроме этих авторов в работе над книгой принимали участие А.В. Юрченко (подразделы 2.4–2.6), Д.С. Жданов (подраздел 3.4, 6.3), А.В. Васильев (подраздел 3.3), Г.С. Глушков (подразделы 4.5, 6.2, 6.4) и Д.В. Саньков (подраздел 6.5).

Авторы выражают свою искреннюю признательность рецензентам: профессорам В.И. Гончарову и Ю.М. Осипову, доценту В.С. Шидловскому за полезные замечания, высказанные ими после ознакомления с рукописью данной книги, а так же В.А. Гайдашовой, оказавшей большую помощь в подготовке книги.

Отзывы, критические замечания и пожелания по данному учебному пособию просьба направлять по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30 Томский политехнический университет или по e-mail: [seg@post.tomica.ru](mailto:seg@post.tomica.ru)

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ В МЕХАТРОНИКЕ

## 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 такие как:

- 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 сообщающей 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 случае о ценности информации для достижения поставленных целей [1.1].

В 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 по средствам 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 [1.1]:

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

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 код.

**Равномерными** называют коды, у которых все комбинации имеют одинаковую длину. Для равномерного кода число возможных комбина-

ций 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** характерны 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 [1.1].

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

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 разнообразие 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 сиг-

налом. 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 частично, 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)** [1.1].

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 [1.1].

**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. и т. п. 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 сиг-



налы 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 авирующих 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 сигналов 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 есте-

ственных 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) **Непрерывный или аналоговый** 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. аналогичные порождающим процессам (случайные сигналы этого типа называются непрерывными случайными процессами).



Рис. 1.1. Непрерывный или аналоговый сигнал

2) **Дискретизированный или дискретно непрерывные** сигналы (рис. 1.2) определены лишь в отдельные моменты времени и могут принимать любые значения уровня. Временной интервал  $\Delta t$  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).

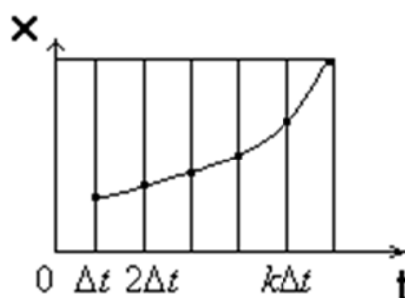


Рис. 1.2. Дискретизированный или дискретно непрерывный сигнал

3) **Дискретные по уровню или квантованные** сигналы (рис. 1.3) определены для всех моментов времени и принимают лишь разрешенные

значения уровней отделенные от друг 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 уровня или по времени или одновременно по уровню и времени называется – **квантование**.

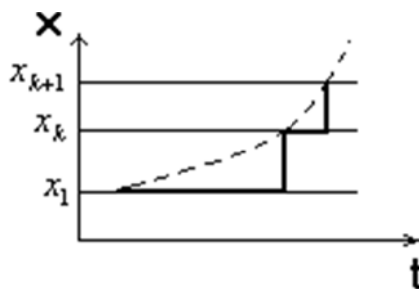


Рис. 1.3. Дискретные по уровню или квантованные сигнал

**Квантование времени** – преобразование сигнала в последовательность следующих друг за другом импульсов, амплитуда, длительность, или частота которых зависят от амплитуды входного сигнала.

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

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

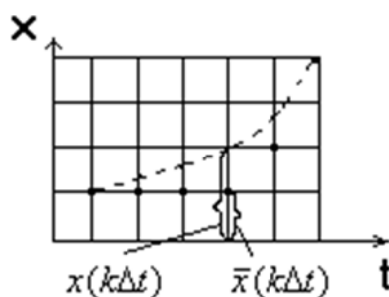


Рис. 1.4. Дискретные по уровню и по времени сигнал

**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  $F_{\max}$ , то

есть  $F_d > 2 \cdot F_{\max}$ , то полученный дискретный сигнал  $s(k)$  эквивалентен сигналу  $s(t)$ . (см. теорему Котельникова) [1.1]. 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, то есть обрабатывать сигнал в реальном времени. Для обработки 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 не линейные;
- 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. Объекты, образующие информационную систему, могут иметь совершенно произвольную природу [1.1].

Из этого, конечно, не следует, что теория информации призвана замечать 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.

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.

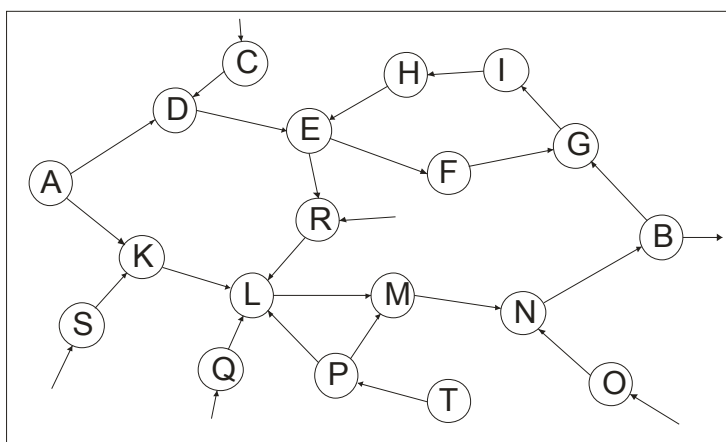


Рис. 1.5. Упрощённая схема систем объектов

Существенные связи между объектами изображены стрелками, направление которых соответствует переходу от причины к следствию. 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 как 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, как 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, ко 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, 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 информационных 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 [1.1–1.3].

Существует много разновидностей систем связи, к ним относятся почта и радиовещание, телефон и телеграф, акустические системы связи и сигнальная веревка водолазов и т. д. и т. п. 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.

При необходимости описания потенциальных возможностей системы связи можно условиться не учитывать конкретных особенностей 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.

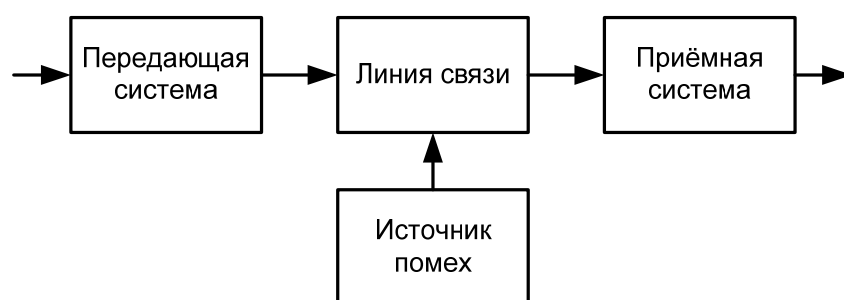
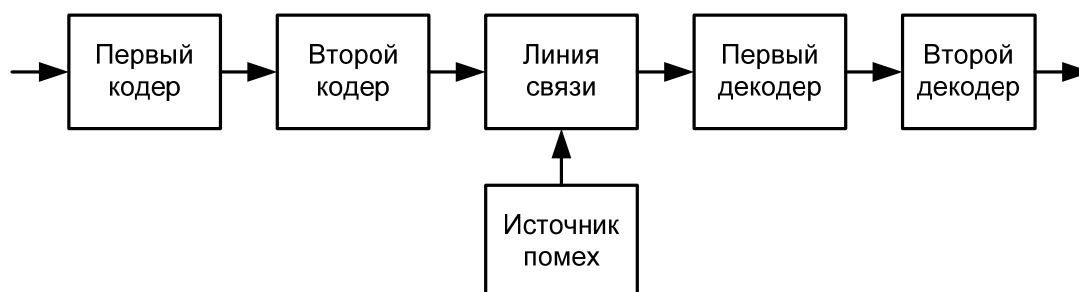


Рис. 1.6. Блок-схема канала связи

**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 (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 может 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 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 второго кодирующего устройства состоит в представле-

нии 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 обычно системы с памятью и системы без памяти 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. Преобразова-

ние информации ставит ряд сложных проблем, лишь часть из которых разрешена теорией информации в достаточной степени полно [1.1–1.3].

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 дискретные 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 неиз-

вестного 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 правдоподобности 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 весьма часто в 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, используемых в мехатронике**

Напомним, что информационной системой называют совокупность взаимосвязанных средств, которые осуществляют передачу, хранение и обработку информации, 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:

**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 индустрии, по крайней мере, выделяют следующие типы систем по назначению [1.2, 1.3]:

**АСУ** – автоматизированные системы управления;

**АСУП** – автоматизированные системы управления предприятия;

**АСКУЭ** – автоматизированная система 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** – система контроля (и управления) доступом;

**СПД** – системы передачи данных;

**Автоматические информационные системы** – выполняют все операции по переработке информации без участия человека, различные роботы. Примером автоматических информационных систем являются



некоторые поисковые сервера Интернет, например Google, где сбор информации о сайтах осуществляется автоматически поисковым роботом и человеческий фактор не влияет на ранжирование результатов поиска.

Системы и комплексы, автоматизированные с помощью роботов, называют *роботизированными*. Роботизированные системы и комплексы, в которых роботы выполняют основные функции, называют *робототехническими*.

На рис. 1.8 изображена структурно-функциональная схема робота. Достаточно развитый робот состоит из трех систем: информационной, управляющей, исполнительной [1.4].

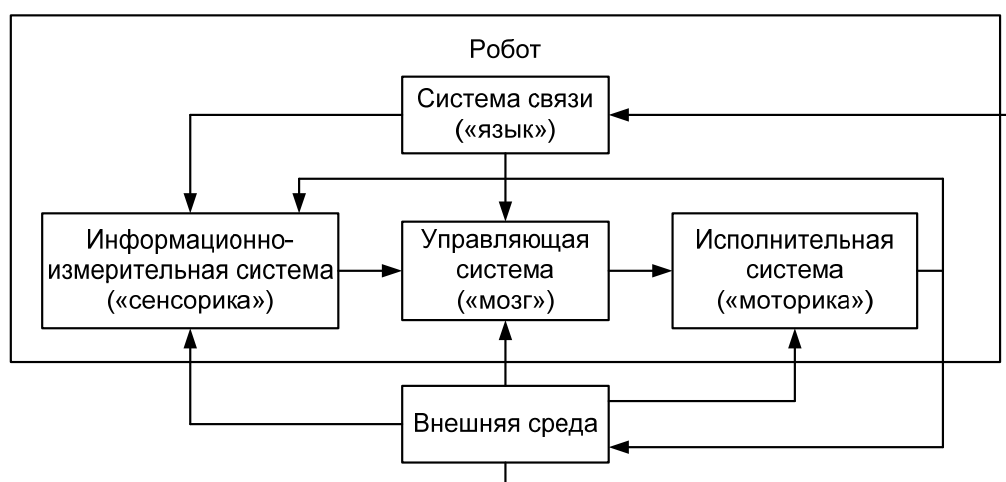
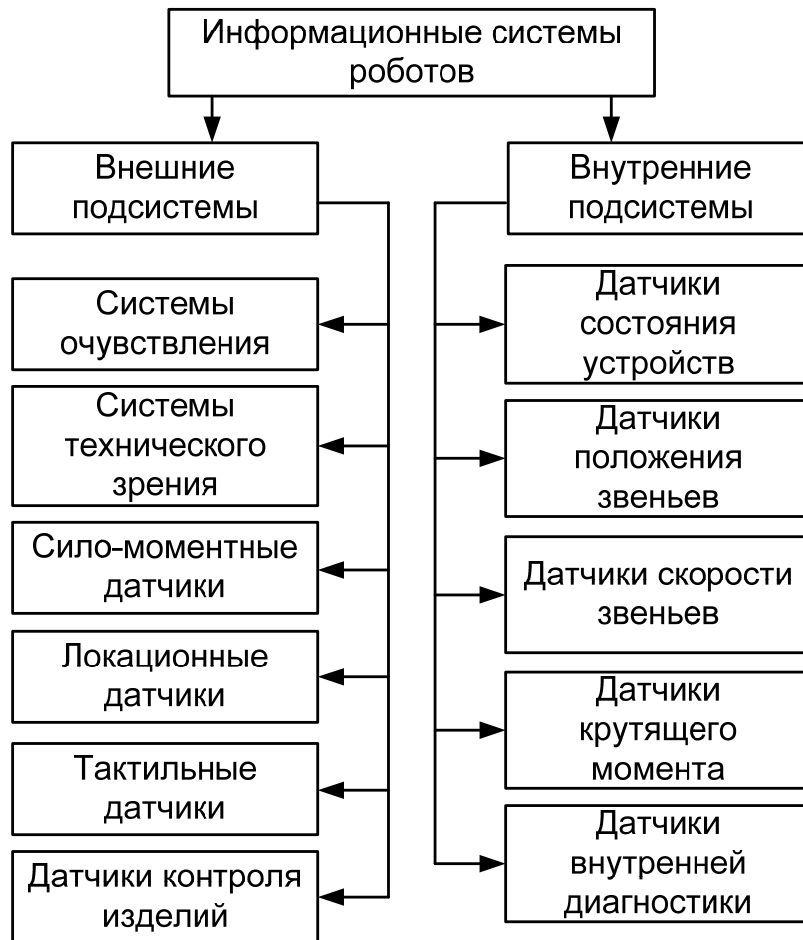


Рис. 1.8. Структурно-функциональная схема робота

Информационная (сенсорная) система, как и органы чувств человека, предназначена для сбора информации о состоянии внешней среды. В качестве ее элементов используются телевизионные, светолокационные, ультразвуковые, тактильные и другие датчики. Функционально органы очувствления роботов (мехатронных систем) – датчики – можно подразделить на два основных типа: датчики внутреннего состояния, датчики внешнего состояния (рис. 1.9).

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. 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.



*Рис. 1.9. Классификация информационных систем, используемых в промышленных роботах*

Управляющая система, как и мозг человека, служит для выработки законов управления двигателями исполнительных органов на основании существующих предписаний (программ) и собранной информации.

Исполнительная система служит для отработки управляющих сигналов. Она реализуется в виде манипулятора.

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.

Механический манипулятор состоит из звеньев, соединенных вращательными или поступательными сочленениями (рис. 1.10). 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.

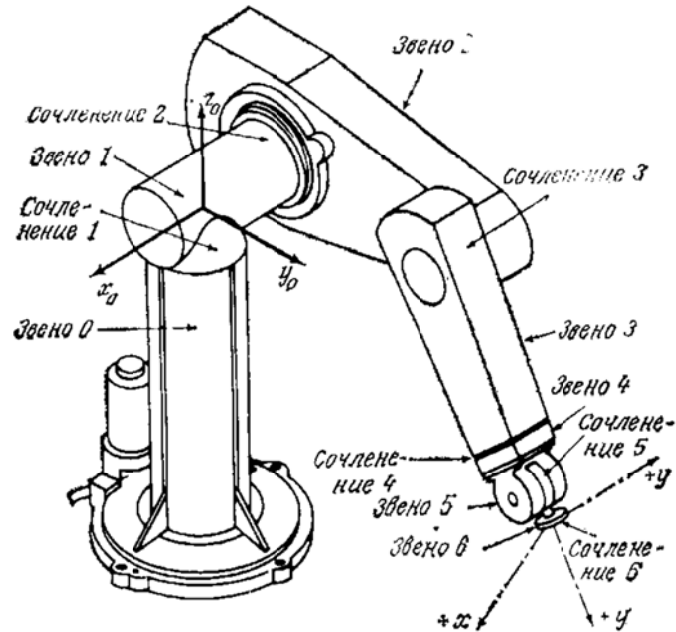


Рис. 1.10. Звенья и сочленения манипулятора Пума

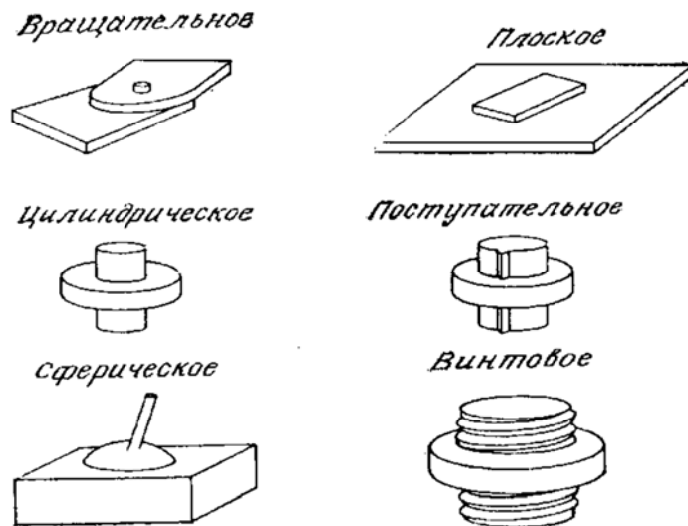


Рис. 1.11. Элементарные сочленения

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.

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

Известно всего шесть различных элементарных сочленений: вращательное, поступательное (призматическое), цилиндрическое, сферическое, винтовое и плоское (рис. 1.11.).

### **Контрольные вопросы к разделу 1**

- 1.1. Дайте определение информационной системы.
- 1.2. Назовите четыре типа объектов информационных систем.
- 1.3. Дайте определение системам связи.
- 1.4. Какие главные характеристики определяют системы хранения информации?
- 1.5. Дайте классификацию информационным системам, используемым в мехатронике.
- 1.6. Назовите три класса ИС, различаемых по степени автоматизации.
- 1.7. Что такое сигнал?
- 1.8. Назовите два основных класса сигналов.
- 1.9. Какие сигналы относятся к типу прямых?
- 1.10. Назовите основные свойства информации.
- 1.11. Дайте определение квантования ПО.
- 1.12. В чём заключается суть кодирования?
- 1.13. Какие виды фильтров вы знаете?
- 1.14. Расскажите о методах и средствах передачи информации.

### **Список литературы к разделу 1**

- 1.1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 477 с.
- 1.2. Энциклопедия кибернетики. – Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. – Том 1. – 608 с.
- 1.3. Энциклопедия кибернетики. Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. – Том 2. – 624 с.
- 1.4. Попов Э.В., Фридман Г.Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. – 456 с.

## 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

### 2.1. Введение

Метрологии информационных систем придается большое значение [2.1, 2.2, 2.3]. 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 [2.4].

**Измерение** (*measurement*) – познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины (*of a measurand*) опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений [2.4].

**Измеряемая величина** (*measurand*) – величина, подлежащая измерению [2.4].

**Величина** (*quantity*) – свойство (атрибут) физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно [2.4].

**Размер величины** (*size of a quantity*) – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «величина» [2.4].

**Значение величины** (*value of a quantity*) – выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц [2.4].

**Единица величины** (*unit of a quantity*) – величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице [2.4].

**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 [2.4].

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 года, явилась Метрическая Конвенция, а первой межправитель-

ственной 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 [2.4].

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, выпускаемых 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.

## **2.2. Общие сведения о метрологическом обеспечении ИС**

Применительно к ИС, используемых, например в роботехнике, 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 математикой 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, аппаратное 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 [2.2] 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 ИС.

Внедрение и эксплуатация ИС обязательно предполагает 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 ИС.

### 2.3. Метрологические характеристики информационных систем

Характеристики, определяющие результаты измерения ИС, описываются следующим образом.

1. Функция преобразования (корреляционная функция) зависимость информативного параметра выходного сигнала ИС от информативного параметра его входного сигнала (то есть 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  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$ ,  $\Delta \alpha_i$ ), 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  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_\alpha$ , математическое ожидание  $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta M_\alpha$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_x^\delta$ ,  $\sigma_y^\delta$ ,  $\sigma_\alpha^\delta$  систематической составляющей погрешности.

2. Среднеквадратическое отклонение  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_\alpha$  случайной составляющей погрешности (а также автокорреляционная функция или функция спектральной плотности случайной составляющей погрешности).

3. Случайная составляющая  $\sigma_x^H$ ,  $\sigma_y^H$ ,  $\sigma_\alpha^H$  погрешности от гистерезиса – вариация показания ИС.

4. Характеристика погрешности в интервале влияющей величины (систематические и случайные составляющие погрешности).

5. Помехоустойчивость это сохранение работоспособности ти системы при наличии помех различного вида (мультипликативные, ад-



дитивные). Характеристикой помехоустойчивости является вероятность  $p$  правильной работы, определяемая отношением числа правильных «ответов»  $p_{\text{пр}}$  ИС к общему числу испытаний  $p_{\text{об}}$ , то есть  $p = p_{\text{пр}} / p_{\text{об}}$ . 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  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  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 ИС, ограниченная начальным (например  $\Delta x_{\text{min}}$ ,  $\Delta y_{\text{min}}$ ,  $\Delta \alpha_{\text{min}}$ ) и конечным (например,  $\Delta x_{\text{max}}$ ,  $\Delta y_{\text{max}}$ ,  $\Delta \alpha_{\text{max}}$ ) 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 ИС. 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,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_\alpha$ ,  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_\alpha$ ) 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 ИС, вызванные изменениями влияющих величин ( $N_{\text{ч}}$  и др.), в установленных пределах.

К динамическим характеристикам ИС относятся следующие характеристики.

1. Полная динамическая характеристика аналоговых ИС, которая выбирается из известных характеристик (переходная, импульсная переходная, амплитудно-фазовая, амплитудно-частотная, совокупность амплитудно-частотой 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  $t_u$ .

Время реакции  $t_r$  – это время установления показаний (для ИС 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 торкаторого 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  $t_u$ , оценки параметров) – время, прошедшее с момента измерения измеряемой величины до момента регистрации нового результата измерения на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

К метрологическим характеристикам ИС относятся также информативные параметры выходного сигнала – параметры выходного сигнала, не используемые для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала или не являющейся выходной величиной меры [2.1].

К неинформативным параметрам выходного сигнала ИС относятся 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 ИС. Косвенной характеристикой  $I$  является число  $N_{\Sigma}$ , 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 ИС 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.

## 2.4. Погрешности ИС

### 2.4.1. Общие сведения о погрешностях измерений

Кратко рассмотрим погрешности измерений [2.4].

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 подчиняется 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:

$$a_{cp} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}.$$

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:

$$M_N(X) = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{N} = X_1 \frac{m_1}{N} + X_2 \frac{m_2}{N} + \dots + X_n \frac{m_n}{N};$$

$$M(X) = X_1 p(X_1) + X_2 p(X_2) + \dots + X_n p(X_n),$$

$$M(X) = \sum_{i=1}^n X_i p(X_i),$$

где  $m_n$  – число значений измеряемой величины;  $X_n$  – случайная величина;  $N$  – число измерений;  $P$  – вероятность появления  $i$ -ой величины.

Дисперсия непрерывной величины определяется

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i.$$

Дисперсия дискретной величины определяется

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 W(x) dx.$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}.$$

## 2.4.2. Виды распределений случайных величин

### 2.4.2.1. 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 функцией 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  $F(x)$ :

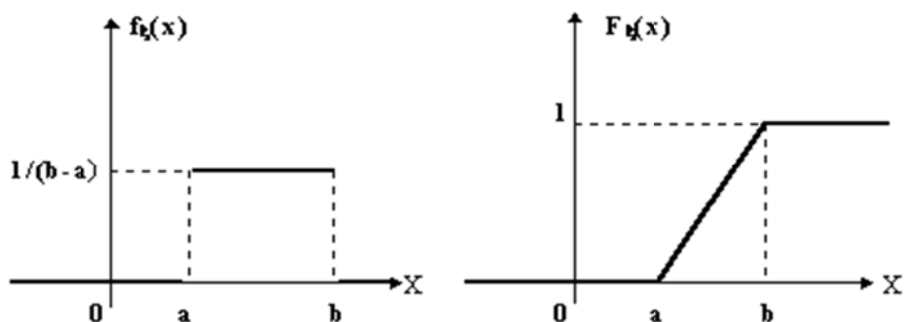


Рис. 2.1. Плотность равномерного распределения и интегральная функция распределения случайной величины

Наконец, найдем вероятность попадания значений равномерно распределенной случайной величины на интервале  $(a, b)$  в интервал  $(\alpha, \beta)$ :

$$P(\alpha < X < \beta) = \frac{\beta - \alpha}{b - a}.$$

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.

#### 2.4.2.2. 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 вели-

чина 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) представлены на рис. 2.2:

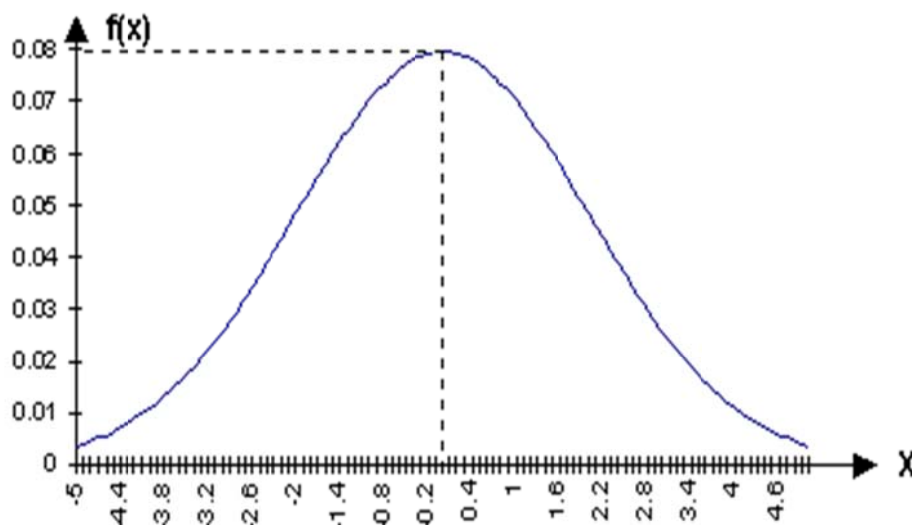


Рис. 2.2 График плотности вероятности для нормального распределения

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  $\sigma$ , то кривая изменяет свой вид в зависимости от  $\sigma$ .

**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.

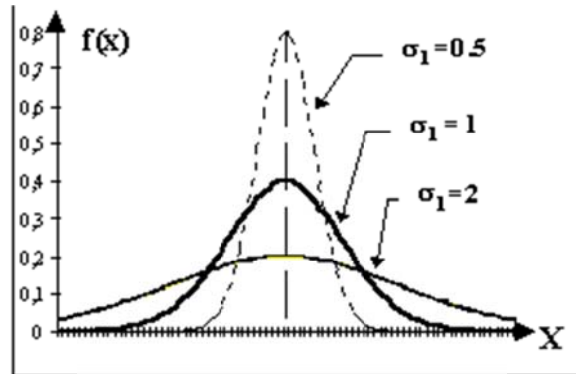


Рис. 2.3. Вид кривой  $f(x)$  в зависимости от  $\sigma$

С помощью  $F(x)$  можно вычислять вероятность того, что нормальная случайная величина с параметрами  $(a, \sigma^2)$  примет значение из интервала  $(\alpha, \beta)$ .

Именно,

$$P(\alpha < X < \beta) = F\left(\frac{\beta - a}{\sigma}\right) - F\left(\frac{\alpha - a}{\sigma}\right).$$

#### 2.4.2.3. 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:

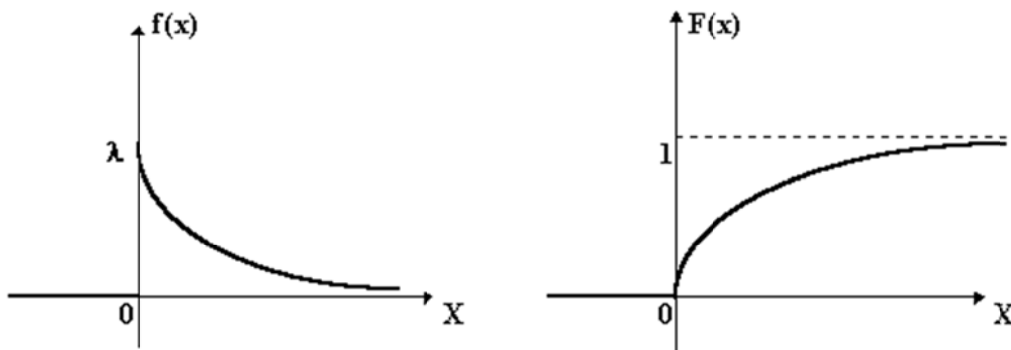


Рис. 2.4. Виды функций  $f(x)$  и  $F(x)$  для экспоненциального распределения

### 2.4.3. Классификация погрешностей

Классификация возможных погрешностей ИС представлена на рис. 2.5. При классификации погрешностей используем следующие основания: закономерность, характер взаимодействия объекта распознавания с внешней средой и ИС, компоненты системы. Дадим краткую характеристику основных видов погрешностей.

Методические погрешности ИС 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 ИС 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) ИС.

Энергетическая составляющая погрешности измерений обусловлена потреблением ИС мощности от исследуемого объекта. Энергетическая составляющая мощности может также возникать при передаче мощности исследуемому объекту от ИС; например, из-за изменения цвета ОР, освещаемого внешним источником цвета.



Типичными для ИС являются четыре следующие составляющие инструментальной погрешности измерений:

1. Погрешность, обусловленная неидеальностью собственных свойств системы, то есть, 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 сигнала относительно их нормальных значений. Эта составляющая называется дополнительной погрешностью.
3. Погрешность, обусловленная реакцией ИС на скорость (частоту) изменения выходного сигнала (характеризующего, например, скорость изменения положения ОР). Эта составляющая называется динамической погрешностью.
4. Погрешность, обусловленная взаимодействием ИС и объекта измерения.

Следует различать погрешность ИС в динамическом режиме и динамическую погрешность. В первом случае понимают погрешность ИС, возникающую при изменении характеристик (очертание контура, цвета) и положения ОР (при его движении). Во втором случае – разность между погрешностью ИС в динамическом режиме и его статистической погрешностью.

Инструментальные погрешности определяются по-разному для аналоговой (аналого-цифровой) и цифровой ИС. ИС 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 aberrациями и астигматизмом.

Погрешности анализатора изображений вызваны следующими факторами: 1) конечной разрешающей способности фотоприемника; 2) нелинейностью разверток и видеоусилителя; 3) внутренних шумов.

Погрешности, обусловленные качеством работы блока памяти определяются погрешностью его узлов.

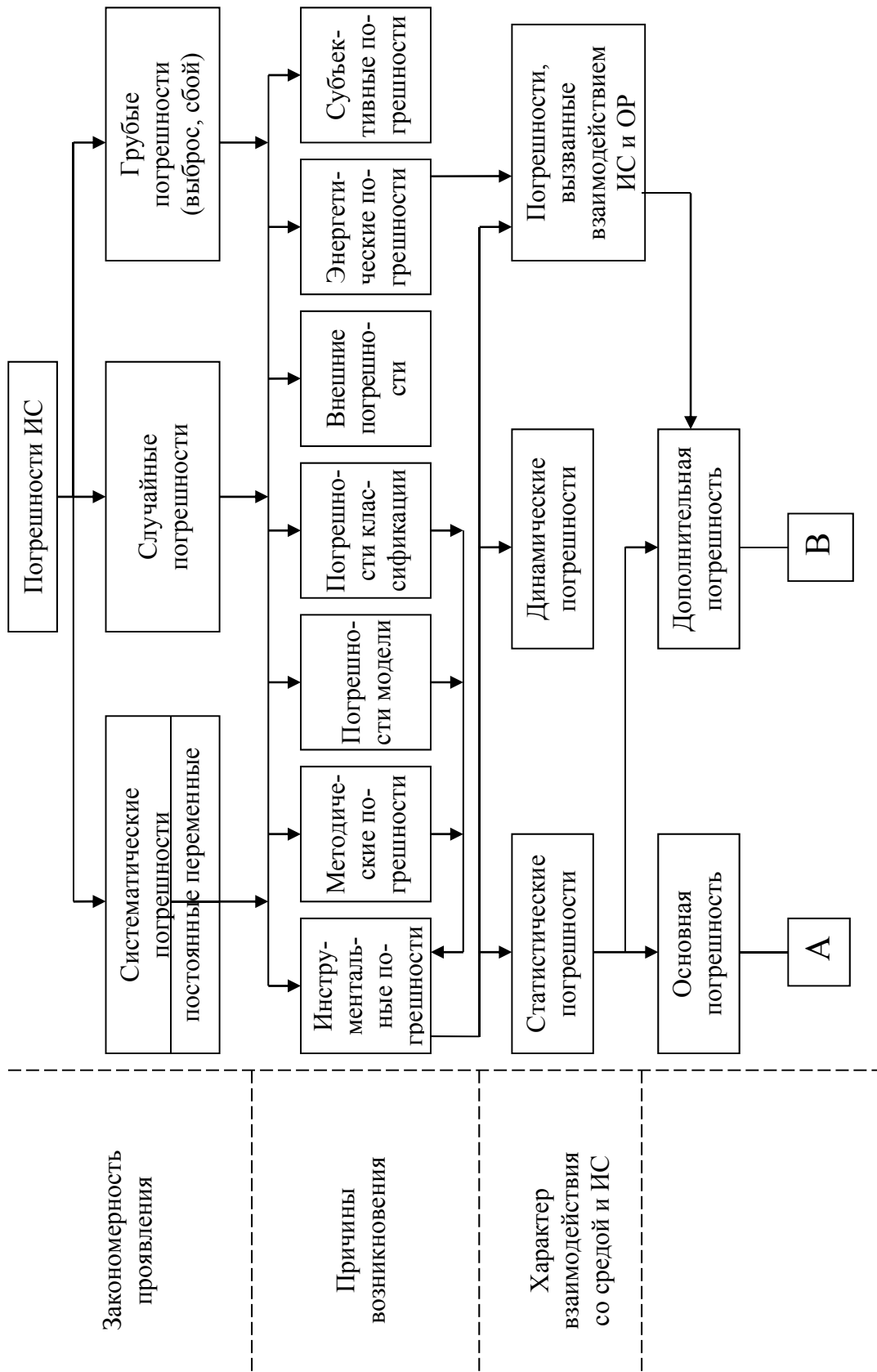
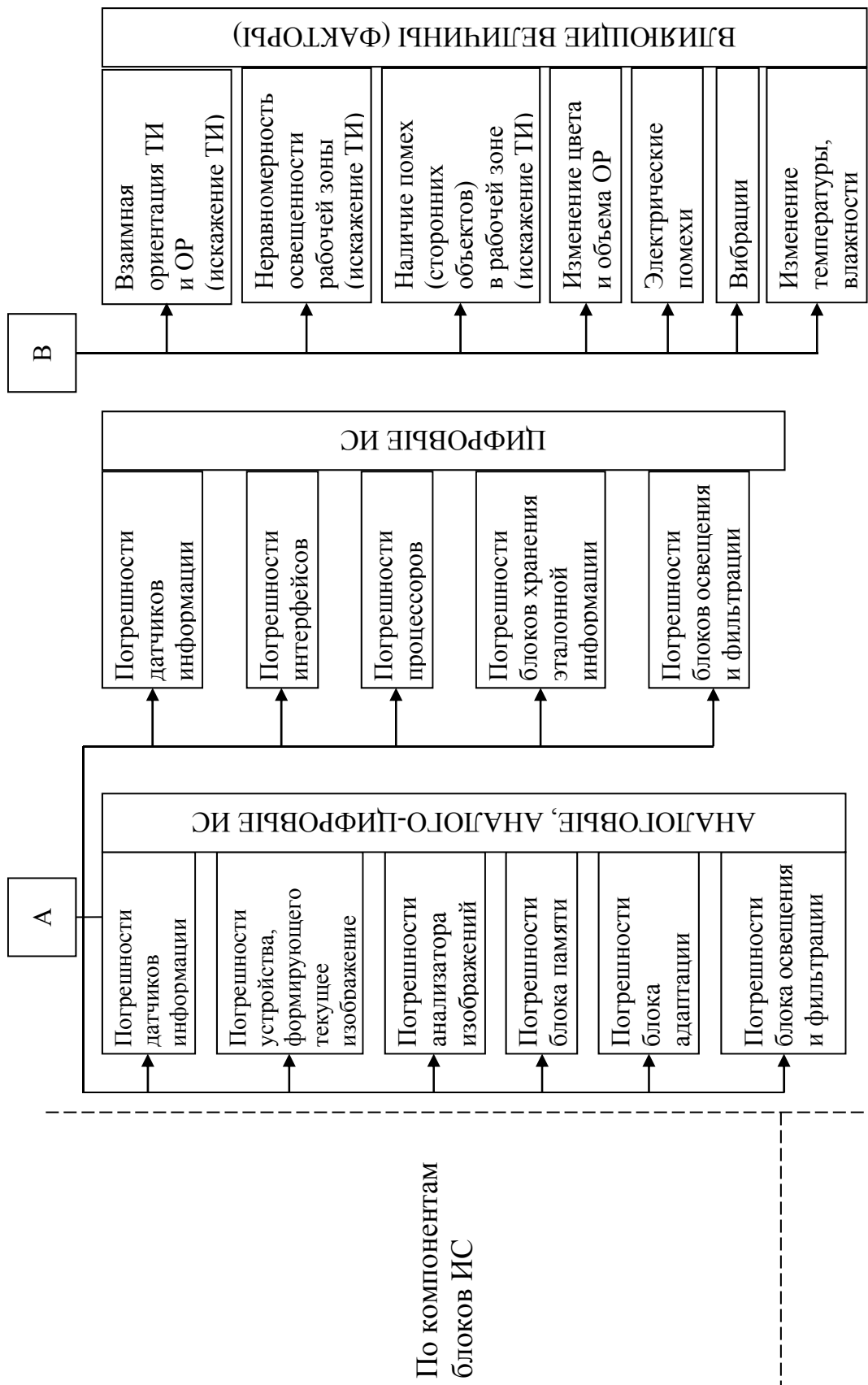


Рис. 2.5. Классификация погрешностей ИС



Продолжение рис. 2.5

Погрешности блока адаптации обусловлены, прежде всего, качеством реализации алгоритмов подстройки параметров ИС, а погрешности блока освещения – качеством реализации алгоритмов создания необходимого освещения (очередность включения светильников, сила света, требуемая цветность освещения, своевременность установления световолоконных элементов и др.).

Погрешности цифровых ИС вызваны ошибками работы следующих блоков зрительной системы: погрешностью датчика ТИ, погрешностью интерфейсов, погрешностью процессоров, погрешностью блока хранения эталонной информации и погрешностью блоков освещения и фильтрации.

Погрешность датчика ТИ цифровых ИС определяется аналогично погрешностям датчика ТИ ИС 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 микро-ЭВМ.

Погрешности процессоров вызваны в основном методическими ошибками и сбоями в их работе. Аналогично характеризуются ошибками, как и погрешности процессоров, блоки хранения эталонной информации.

#### 2.4.4. Оценка статистических характеристик погрешностей ИС

Определим статистические характеристики погрешностей ИС на примере зрительной системы робота. Для простоты рассмотрим определение статистических характеристик погрешности оценки трех искомым параметров ОР – линейных и угловой координат  $\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha$ , 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 ИС 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 ИС 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:

$$\hat{\sigma}_x^B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta'_{ix} - \Delta'_x)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_{ix} - \Delta''_x)^2}{2n-1}},$$

$$\sigma_y^B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta'_y - \Delta'_y)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_y - \Delta''_y)^2}{2n-1}}, \quad (2.1)$$

$$\hat{\sigma}_\alpha^B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta'_{i\alpha} - \Delta'_\alpha)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_{i\alpha} - \Delta''_\alpha)^2}{2n-1}},$$

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  $\Delta'$  и  $\Delta''$ , полученные экспериментально при изменении информативного параметра (положения ОМ) со стороны меньших

(для  $\Delta'_{xi}, \Delta'_{yi}, \Delta'_{ai}$ ) и больших (для  $\Delta''_{xi}, \Delta''_{yi}, \Delta''_{ai}$  значений до значения  $\{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \alpha_i\}$ ).

Вариация выходного сигнала ИС 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 (2.1) 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 ИС.

Значения  $\bar{\Delta}'_x, \bar{\Delta}'_y, \bar{\Delta}'_\alpha, \bar{\Delta}''_x, \bar{\Delta}''_y, \bar{\Delta}''_\alpha$ ; в формулах (2.1) находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}'_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{ix}, & \bar{\Delta}''_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{ix}, \\ \bar{\Delta}'_y &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{iy}, & \bar{\Delta}''_y &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{iy}, \\ \bar{\Delta}'_\alpha &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{i\alpha}, & \bar{\Delta}''_\alpha &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_{i\alpha}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

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

$$\begin{aligned}\hat{\delta}_x^B &= \frac{\bar{\Delta}'_x + \bar{\Delta}''_x}{2}, \\ \hat{\delta}_y^B &= \frac{\bar{\Delta}'_y + \bar{\Delta}''_y}{2}, \\ \hat{\delta}_\alpha^B &= \frac{\bar{\Delta}'_\alpha + \bar{\Delta}''_\alpha}{2}.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Если вариация отсутствует, то данные оценки определяются

$$\begin{aligned}\delta_x &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{ix}, \\ \delta_y &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{iy}, \\ \delta_\alpha &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_{i\alpha}.\end{aligned}\tag{2.4}$$

Суммарная погрешность КСТЗ при независимости ее случайных составляющих равна

$$\begin{aligned}\Delta_x^\Sigma &= \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{xi} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{xi}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{xi}^2}, \\ \Delta_y^\Sigma &= \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{yi} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{yi}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{yi}^2}, \\ \Delta_\alpha^\Sigma &= \sum_{i=1}^{n_c} \delta_{\alpha i} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{m_p} \delta_{\alpha i}^n + \sum_{i=1}^{P_C} K_i \sigma_{\alpha i}^2}.\end{aligned}\tag{2.5}$$

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 перемен-

ных 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  $\Delta'_\Sigma$  определяется по результирующей функции распределения частных систематических и случайных погрешностей ИС, которая находится как композиция распределения упомянутых частных погрешностей [2.1]:

$$p^I = \frac{\int_{-\infty}^V h_\Sigma(z) dz}{\int_{-\infty}^{\infty} h_\Sigma(z) dz},$$

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  $h'_1 = \varphi(x), h'_2 = \varphi(y), h'_2 = \varphi(y)$ ;  $z$  – вспомогательная переменная, введенная так, что  $x = f + z, y = -cz$ , а  $f = x + y, c = \pm 1$ .

В [2.1, 2.2] 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 [2.2]:

- 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



$$M_{xinstr} = \sum_{i=1}^4 M_{xi}, \quad M_{yinstr} = \sum_{i=1}^4 M_{yi}, \quad M_{\alpha instr} = \sum_{i=1}^4 M_{\alpha i},$$

$$D_{xinstr} = \sum_{i=1}^4 D_{xi}, \quad D_{yinstr} = \sum_{i=1}^4 D_{yi}, \quad D_{\alpha instr} = \sum_{i=1}^4 D_{\alpha i}. \quad (2.6)$$

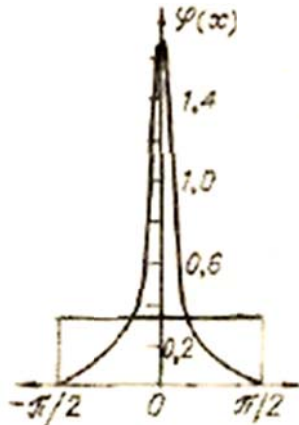


Рис. 2.6 Плотность распределения вероятностей погрешностей

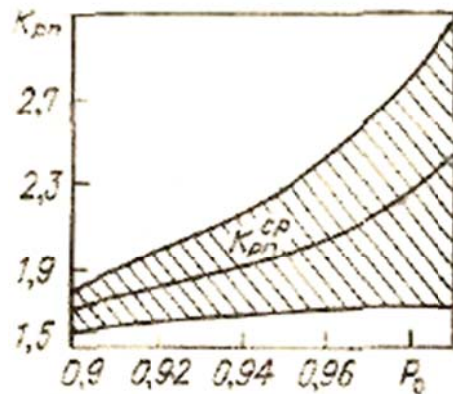


Рис. 2.7 Зависимость коэффициента  $K_{p\Pi}$  от вероятности  $P_0$

- 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  $\sigma_{xinstr} = +\sqrt{D_{xinstr}}$ ,  $\sigma_{yinstr} = +\sqrt{D_{yinstr}}$ ,  $\sigma_{\alpha instr} = +\sqrt{D_{\alpha instr}}$ ;  $K_{p\Pi}$  – 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  $\Delta_{xinstr}$ ,  $\Delta_{yinstr}$ ,  $\Delta_{\alpha instr}$  – усеченная, одномодальная, симметричная функция, находящаяся в широкой области плотностей распределения от равномерной до весьма острой (рис. 2.6), можно выбрать среднее значение коэффициента  $K_{p\Pi}$

по графику, приведенному на рис. 2.6 [2.2]. Этот график показывает зависимость от вероятности  $P_0$  среднего значения ( $K_{cp}$ ) коэффициента  $K_{p\Pi}$  для данной группы плотностей распределения. На рис. 2.7 заштрихована область возможных действительных функций зависимости  $K_{p\Pi}$  от  $P_0$ . При увеличении вероятности отклонения границ этой области от  $K_{p\Pi}^{cp}$  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.

## 2.5. Основные этапы измерительных технологий

В дальнейшем будем различать прямые и косвенные измерения [2.5].

**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. 2.8.

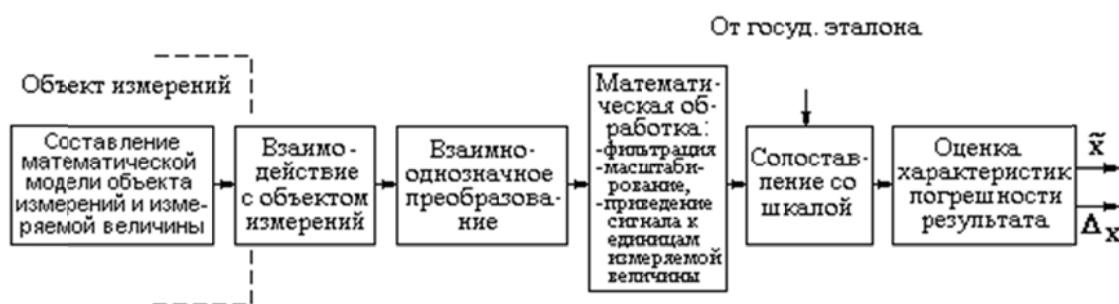


Рис. 2.8. Этапы прямых измерений

Первым этапом перед планированием и выполнением любой измерительной процедуры является 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 распределе-

ния 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  $\Delta p$  и неопределенностью координаты  $\Delta x$  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 другим.

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 взаимнооднозначной 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 взаимнооднозначными, 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 бла-

годаря 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  $\Delta_x$  погрешности этого результата, то есть характеристик остаточной неопределенности значения измеряемой величины.



Рис. 2.9. Этапы прямых измерений

Этапы выполнения косвенных измерений представлены на рис. 2.9. От процедуры прямых измерений она 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  $\Delta_w$ .

## 2.6. Примеры взаимодействия датчиков с объектом измерений

**Объект измерения – электрическая цепь.** Измерению подлежит параметр этой цепи, а именно, постоянное напряжение на ее участке, сопротивление которого равно  $R_H$  (см. рис. 2.10 а) [2.5]. Эквивалентное сопротивление остальной части цепи равно  $R_b$ . Истинное значение измеряемого напряжения, которое было на сопротивлении  $R_H$  до подключения вольтметра, равно  $U_x$ . Средство измерений – стрелочный вольтметр, собственное сопротивление которого указано в его технической документации. Для расчета эффекта, производимого взаимодействием, будем считать, что инструментальная погрешность вольтметра равна нулю.

$$U_x = E \frac{R}{R + R_b}, \quad \tilde{U} = E \frac{R \cdot R_{\%o}}{R \cdot R_{\%o} + R \cdot R_b + R_{\%o} R_b},$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_x = -E \frac{R^2 R_b}{(R \cdot R_{\%o} + R \cdot R_b + R_{\%o} R_b)(R + R_b)}.$$

В этих формулах  $\tilde{U}$  – напряжение, которое образуется после подключения вольтметра и оказывается меньше исходного истинного напряжения в силу шунтирования этого участка цепи сопротивлением вольтметра, общий ток в цепи увеличивается на значение тока, потребляемого вольтметром, и тем самым объект измерений изменяется. В результате этого влияния возникает систематическая погрешность, обозначенная здесь через  $\Delta U$ . По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = -\frac{R_H \cdot R_{\dots}}{(R_H + R_{\dots})} \cdot \frac{1}{R_B}.$$

Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на  $(\tilde{U}^2)$ , увидим, что относительная погрешность, вызванная взаимодействием вольтметра и цепи, равна отношению энергий, то есть частному от деления энергии, потребляемой вольтметром, на энергию, рассеиваемую объектом:

$$\gamma_U = -\frac{R_H \cdot R_{\dots}}{(R_H + R_{\dots}) \cdot (\tilde{U})^2} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} = -\frac{(\tilde{U})^2}{R_B} \cdot \frac{(\tilde{U})^2}{R_{\dots B}},$$

где  $R_{\dots B}$  – сопротивление, «видимое» со стороны вольтметра и равное сопротивлению, образованному параллельным соединением сопротивления нагрузки  $R_H$  и сопротивления цепи  $R_{\dots}$ .

В данном случае эта погрешность может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Остаточная погрешность будет определяться точностью, с которой известны значения величин, входящих в выражение для  $\Delta U$ .

Сопротивление вольтметра  $R_B$  есть одна из его метрологических характеристик, поскольку оказывает влияние на погрешность результата измерений.

**Объект измерения – хорошо перемешиваемая жидкость в сосуде (рис. 2.10 б).**

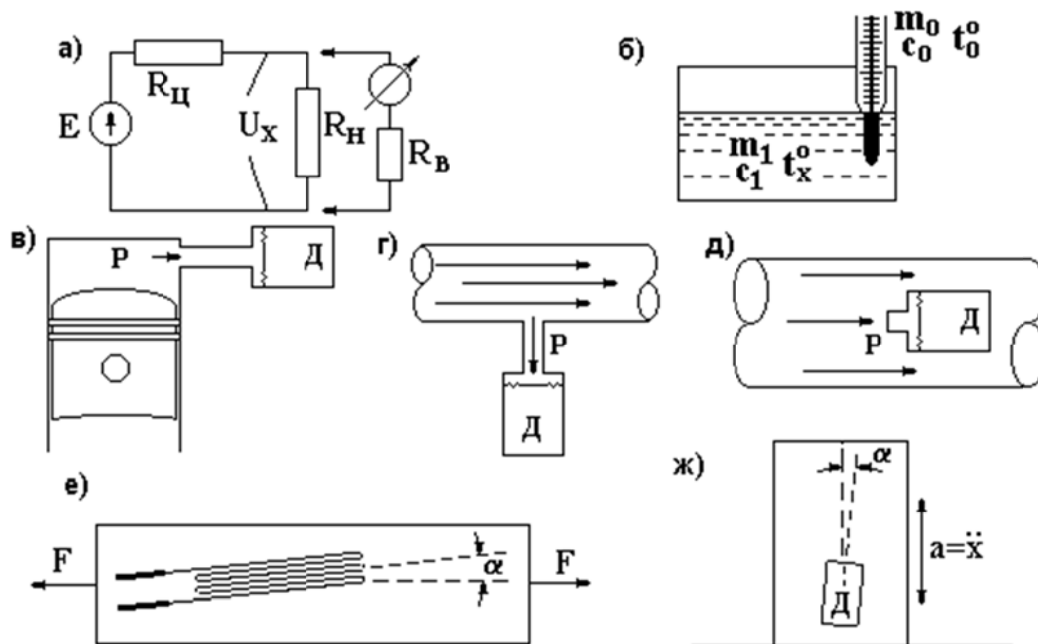


Рис. 2.10. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерения

Измерению подлежит параметр объекта: температура жидкости. Масса жидкости  $m_1$ , удельная теплоемкость  $c_1$ , истинная температура  $t_x^o$ . Средство измерений – ртутный термометр, который будем считать абсолютно точным. Его масса  $m_o$ , удельная теплоемкость погружаемой части  $c_o$ . Собственная температура термометра до его погружения в жидкость равна  $t_o^o$ , ее значение может быть считано со шкалы. Считаем, что теплообмена с внешней средой нет. В таком случае общее количество теплоты сохраняется неизменным, и уравнение теплового баланса имеет вид:

$$t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1 = \tilde{t}^o (m_o c_o + m_1 c_1),$$

где  $\tilde{t}^o$  – установившаяся температура жидкости, а, следовательно, погружаемой части термометра и результат измерения.

Понятно, что если температура термометра была ниже истинной температуры жидкости, температура жидкости снизится и наоборот, поднимется в противном случае. В результате такого взаимодействия термометра с объектом (жидкостью) возникает систематическая погрешность

$$\Delta t^o = \tilde{t}^o - t_x^o = -\frac{m_o c_o}{m_o c_o + m_1 c_1} (t_x^o - t_o^o).$$

По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^o}{\tilde{t}^o} = -\frac{m_o c_o (t_x^o - t_o^o)}{t_o^o m_o c_o + t_x^o m_1 c_1} = -\frac{Q_{T\Gamma} m M}{Q_{\Sigma}},$$

то есть относительная погрешность измерения температуры, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом, равна частному от деления количества теплоты (то есть энергии), необходимой для нагревания (или охлаждения) термометра до измеряемой температуры, на количество общей теплоты, содержащейся в объекте и термометре.

В данном случае эта погрешность систематическая и может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Неисключенный остаток погрешности будет определяться точностью, с которой известны величины, входящие в формулу для  $\Delta t^o$ .

Масса и теплоемкость погружаемой части ртутного термометра являются его метрологическими характеристиками, поскольку оказывают влияние на погрешность результата измерений.

**Объект измерения – цилиндр двигателя внутреннего сгорания** (рис. 2.10, в) [2.5]. Параметр, подлежащий измерению, – давление газов внутри цилиндра. Присоединение датчика Д с помощью трубки приводит к увеличению объема камеры сгорания и тем самым – к изменению объекта. Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической.

**Объект измерения – трубопровод с потоком жидкости или газа** (рис. 2.10 з, д) [2.5]. Параметр, подлежащий измерению – давление транспортируемого вещества. В одном случае (рис. 2.10 г) погрешность, вызванная нежелательным взаимодействием, будет отрицательной, в другом (рис. 2.10, д) – положительной.

**Объект измерения – механическая конструкция.** Параметр, подлежащий измерению – деформация участка конструкции. Средство измерений (датчик) – проволочный тензорезистор. Принцип действия – изменение сопротивления проволоки, из которой изготовлен датчик, при его деформации в пределах упругости. Для передачи деформации от объекта к датчику он приклеивается к объекту специальным неэластичным клеем (рис. 2.10, е) [2.5]. Погрешность от взаимодействия будет вызвана следующими обстоятельствами:

- неудовлетворительным качеством приклеивания датчика,
- увеличением жесткости объекта за счет приклеивания к нему датчика,
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемой деформации.

Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической, отрицательной.

**Объект измерения – транспортное средство, механическая конструкция, строительное сооружение.** Параметр, подлежащий измерению – ускорение вибраций в заданной точке. Средство измерений – датчик ускорения, жестко устанавливаемый на объекте (рис. 2.10, ж) [2.5]. Погрешность будет вызвана следующими обстоятельствами:

- недостаточная жесткость крепления датчика к объекту, вследствие чего ускорение виброперемещений объекта передается к датчику не полностью,
- увеличением массы объекта на величину массы датчика, вследствие чего изменяется частота собственных колебаний объекта и амплитуда виброускорений,
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемых ускорений.

Для ограничения разброса жесткости крепления датчика ускорений к объекту в технической документации на подобные датчики должно сообщаться значение усилия завинчивания крепящих винтов (при винтовом креплении). Обеспечение заданного усилия крепления датчика осуществляется за счет применения динамометра либо ключей, снабженных устройством дозирования усилия.

Для оценки степени влияния массы датчика на объект измерений в технической документации должно быть приведено значение массы датчика с указанием пределов допускаемых отклонений от номинального значения, как одной из метрологических характеристик, обуславливающих степень взаимодействия с объектом и соответствующую погрешность.

## 2.7. Поверка ИС

Рассмотрим вопросы метрологической поверки ИС (на примере ИС роботов). При поверке ИС должны выполняться следующие операции: внешний осмотр, опробование, определение влияния наклона 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<sub>п</sub>), так и для образцовых (ИС<sub>о</sub>). Следует учитывать, что ИС<sub>о</sub> имеют более высокую точность и область нормальных значений для них более узкая, поэтому условия поверки определяются нормальными внешними условиями именно ИС<sub>о</sub>, а не ИС<sub>п</sub>. Нормальные (допустимые) значения влияющих величин указываются в технической документации. При поверке ИС следует учитывать, что, если ИС комплектуется серийно выпускаемыми изделиями (телекамера, микро-



ЭВМ), то необходимо соблюдать условия поверки, указанные в технической документации на данные изделия.

Поверка ИС производится по двум основным схемам, реализующим метод непосредственного сличения ИС<sub>п</sub> и ИС<sub>о</sub> (рис. 2.11, а, б). В первой схеме (рис. 2.11, а) ДТИ воспринимает ТИ зоны сканирования (ЗС); видеосигнал с датчика передается через коммутатор (К) на ИС<sub>п</sub> и ИС<sub>о</sub>. Информация с ИС<sub>п</sub> и ИС<sub>о</sub> фиксируется на устройствах отображения информации (цифровая печать, осциллограф, телевизор). Во второй схеме (рис. 2.11, 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).

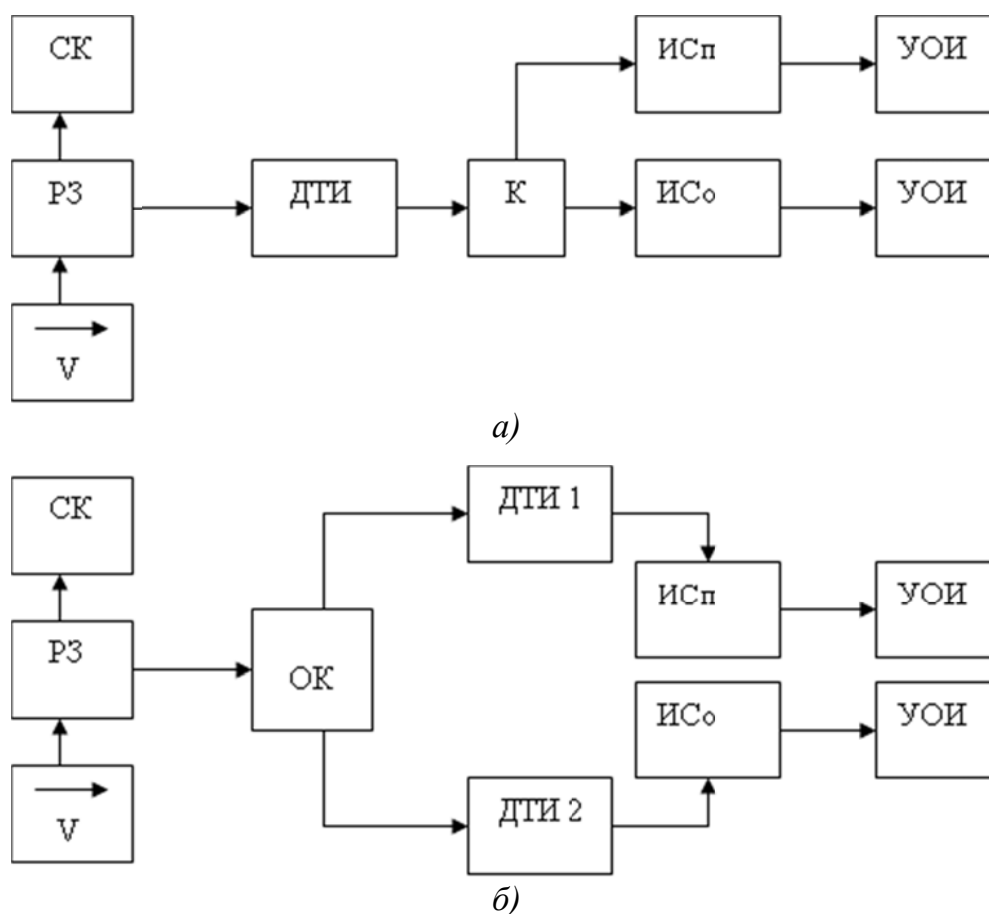


Рис. 2.11. Схемы поверки ИС аналогового, аналого-цифрового и цифрового типов

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 поблочно) можно производить по схеме, представленной упрощенно на рис. 2.12. 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).

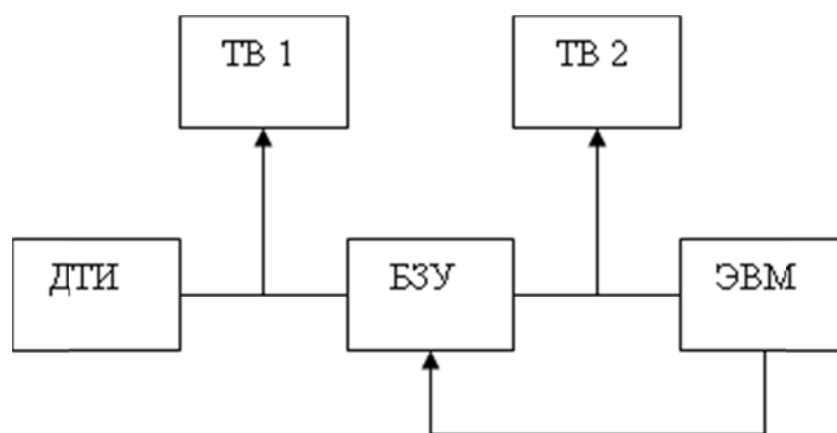


Рис. 2.12. Схема поверки цифровой ИС

Для поверки (исследования) точностных характеристик аналоговых и аналого-цифровых ИС используется специализированная установка, схема которой приведена на рис. 2.13. Установка включает, кроме ИС, стойку датчика ТИ и контрольно-измерительную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА). Стойка ДТИ (см. рис. 2.14) содержит телекамеру 1 и столик 2, на которой 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. ОР3 располагается на размеченной поверхности 10 столика 2, подсвечиваемой снизу источниками света (на рисунке не показаны). Размер столика (0,5×0,5)м, а высота стойки в сборе (0,8÷2,2б)м. Конструкция стойки позволяет изменять значения  $\Psi_x$  ( $\pm 30^\circ$ ),  $\Psi_y$  ( $\pm 10^\circ$ ), Н (0,1÷1,5) м,  $m_1$ (0,5) м и поворачивать столик, датчик ( $\Psi_c = \Psi_g = 360^\circ$ ) и источники света ( $\nu_{и} = 360^\circ$ ). Для контроля  $\Psi_x$ ,  $\Psi_y$ , Н,  $m_1$ ,  $\Psi_c$ ,  $\Psi_g$ ,  $\nu_{и}$  и положения ОР3 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 поверке цифровых ИС отпадает необходимость использования контрольно-измерительной РЭА, показанной на рис. 2.10. Так как в этом случае весь контроль осуществляется с помощью ЭВМ (ее дисплея) и телевизоров (см. рис. 2.12).

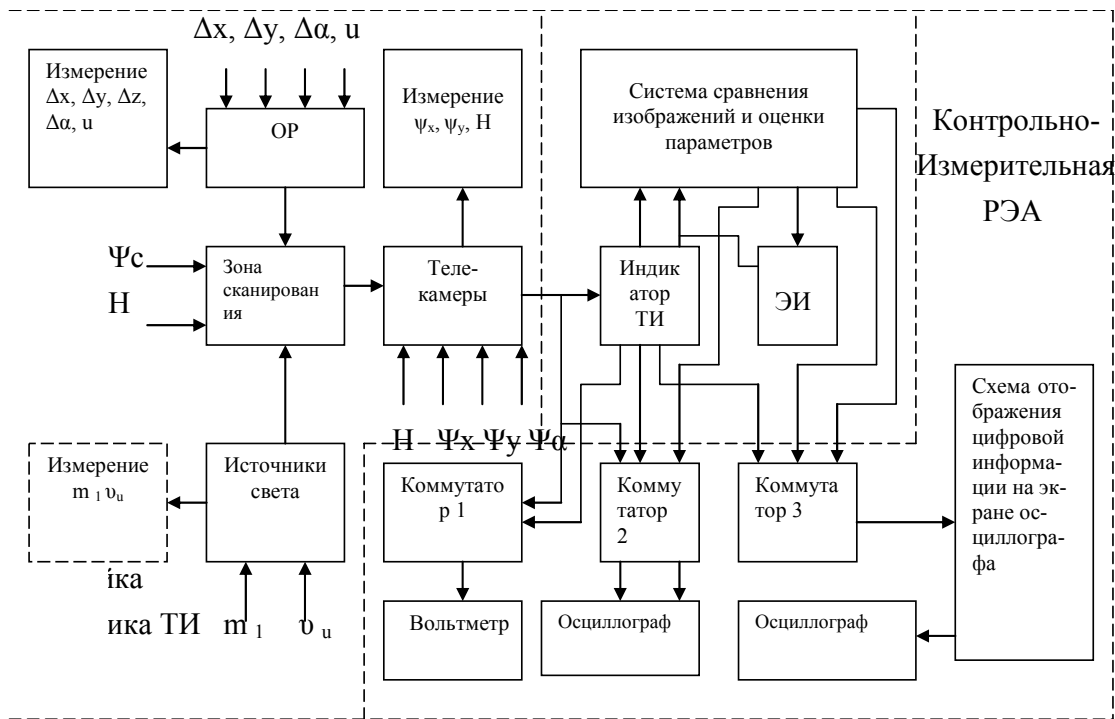


Рис. 2.13. Структурная схема метрологической установки для оценки точностных характеристик ИС

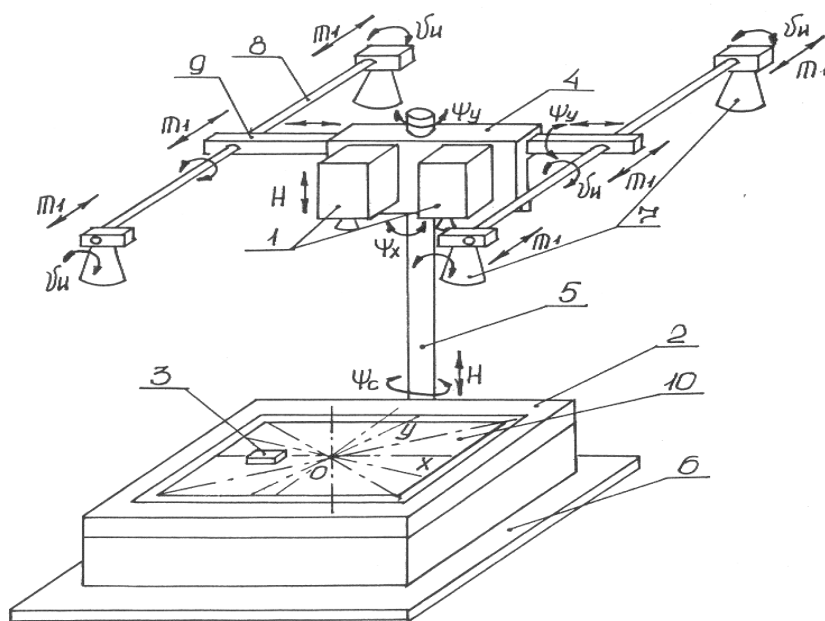


Рис. 2.14 Внешний вид датчика текущего изображения

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 ИС 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  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $\alpha_i$  и проверяются другие технические характеристики ИС.

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  $P$ ,  $P_{ц}$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $\alpha_i$  и проверяются требуемые технические характеристики ИС.

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 п.п. 1, 2, 3 методики при различных скоростях движения рабочей зоны с ОР.

Следует отметить, что п.п. 1, 2, 3 методики соответствуют проверке ИС 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, то есть необходимо установить какие-то границы, за пределы которых погрешности ИС не должны выходить при эксплуатации информационной системы. В зависимости от допускаемых значений погрешности можно присваивать класс точности ИС, как и для любой измерительной системы, предел допускаемой погрешности ИС может устанавливаться в виде абсолютной, относительной и приведенной погрешностей, определяемых известными способами. Наряду основной погрешностью нормированию подлежит и дополнительная погрешность. Методика нормирования указанных погрешностей дана в [2.1].

## 2.8. Контроль и диагностика информационных систем

### 2.8.1. Отказы и надежность информационных систем

Получение адекватной оценки эффективности функционирования является важным этапом проектирования ИС. Эффективность информационной системы принципиальным образом зависит от ее назначения, которое для всякой ИС, состоит в выработке совокупности информационных параметров, на основе данных, поступающих от датчиков. При этом обслуживаемые с помощью ИС 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 ИС являются точность, обеспечиваемая ею при выработке, например, навигационных параметров, и надежность.

Достижение необходимой точности представляет собой сложную научно-техническую задачу, решаемую путем создания совершенных первичных датчиков информации (чувствительных элементов), построения эффективных алгоритмов обработки информации, совместного использования различных ИС в мехатронике. Характерной чертой многих современных ИС и в особенности автономных ИС, используемых, например в робототехнике, является избыточность (структурная и информационная). Это видно из примерного состава современной ИС (рис. 2.15).

В данную ИС входят несколько подсистем, например: внешние датчики очувствления и адаптации робота. Подобные ИС обычно называют интегрированными ИС или навигационными комплексами.

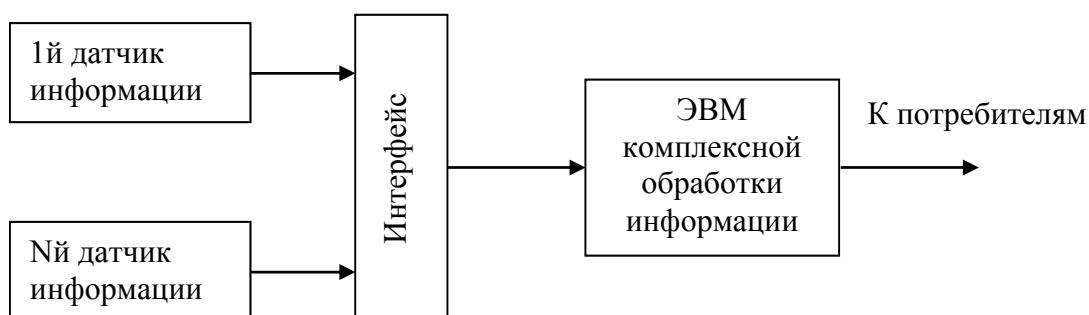


Рис. 2.15. Структура интегрированной информационной системы

Коротко остановимся на подходах, используемых при оценке точности ИС. Под точностью понимается свойство ИС обеспечивать нахождение в пределах некоторого допуска характеристик погрешно-

стей 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 ИС 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 двумерной 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  $\chi_p$  ( $p$ -квантили) погрешности  $x(t)$ , вероятность  $P(|x(t)| < \chi_p)$  превышения 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 превышения этого уровня. На практике в этой части существуют определенные традиции, в соответствии с которыми значение уровня выбирают обычно равным  $3\sigma$ , что в предположении гауссовости плотности распределения вероятностей значений погрешности означает квантиль уровня  $p=0,991$  ( $\sigma$  – среднеквадратическое значение погрешности).

На этапе эксплуатации ИС для формулирования требований по точности выработки некоторого параметра может использоваться зада-

ние 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 ИС является ее надежность. Далее будет показано, что если свойство надежности трактовать для ИС строго в соответствии с ГОСТ, 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 сбоем.

Любой отказ системы является следствием некоторой причины. Традиционно полагается, что к отказам системы приводят дефекты ее элементов, которые в ГОСТ определяются как любые несоответствия элемента предъявляемым требованиям. При этом дефекты различаются по их влиянию на работу элемента и, в частности, выделяются малозначительные и критические дефекты. Малозначительные дефекты несущественны 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 либо произойти 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 непоявления 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 безызбыточна 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 ИС. Очевидно, что ИС 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 ИС включают в себя понятие точности. Далее будем считать, что событие отказа наступает в ИС в случае, когда хотя бы один из навигационных параметров вырабатывается в ИС с повышенной погрешностью или вообще не вырабатывается [2.3].

Событие, представляющее отказ ИС, 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. 2.16 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.

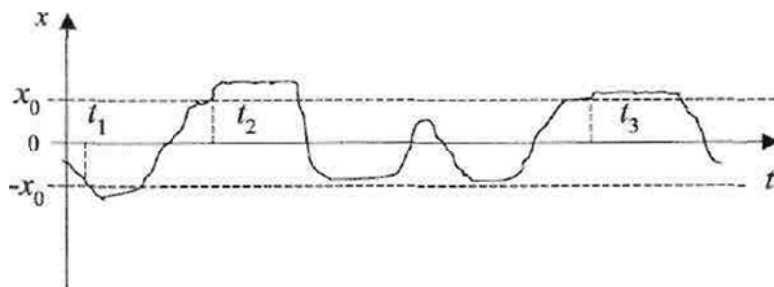
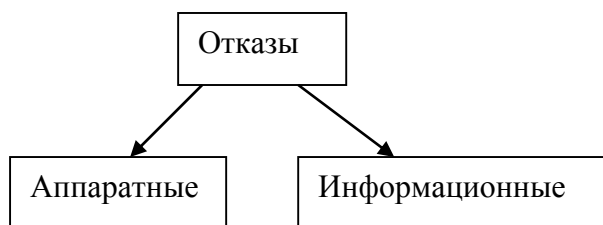


Рис. 2.16. Примеры отказов ИС



Очевидно, что к отказу ИС могут приводить критические дефекты (отказы) ее элементов. Далее такие отказы ИС будем называть аппаратными. Однако характерной особенностью ИС является возможность ее отказа и при отсутствии критических дефектов в элементах. Такие отказы в противоположность аппаратным будем называться информационными. Важным свойством информационного отказа (ИО) ИС 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 ИС 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. 2.17.



2.17. Классификация отказов ИС

Как уже было сказано, причиной аппаратного отказа ИС является критический дефект ее элемента. Причины возникновения информационных отказов весьма разнообразны и зависят от специфики конкретной ИС. Так или иначе это некоторые аномальные события, сопровождающие внутренние или внешние по отношению к ИС физические процессы. Такие события в свою очередь приводят к аномальным событиям в погрешностях ИС, которые называются информационными нарушениями.

Среди причин, приводящих к информационным нарушениям, можно выделить следующие классы:

1. Причины, связанные с датчиками ИС.
2. Причины, связанные с вычислительными устройствами обработки информации (сбои аппаратуры и ошибки программного обеспечения),
3. Причины организационного характера (отсутствие своевременной коррекции автономной ИС, например по причине неблагоприятных метеословий).

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 ИС 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 ИС. Очевидно, что такие информационные отказы не должны учитываться при оценке надежности ИС.

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, ИС, 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 ИС (подсистемы или датчика ИС) 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 ИС. В общем случае не исключается также ситуация, когда одна отдельно взятая компонента погрешности ИС 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 ИС могут быть различными. Оно может привести к информационному отказу ИС, причем событие отказа по отношению к событию нарушения может произойти без задержки или с некоторой задержкой, порой весьма значительной, зависящей от структуры погрешности ИС. Информационное нарушение может не привести к информационному отказу ИС, 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. 2.18. Содержание понятия «надежность»

Подводя итоги вышесказанному, отметим, что понятие надежности ИС является комплексным и включает в себя две составляющие – аппаратную надежность (надежность по аппаратным отказам) и информационную надежность (надежность по информационным отказам) (рис. 2.18). Первая составляющая представляет свойство надежности ИС в традиционном понимании, вторая составляющая представляет свойство точности. Практика показывает, что при функционировании ИС информационный отказ является относительно частым событием. В связи с этим прецизионные ИС всегда включают в свой состав средства для парирования информационных отказов, основанные на использовании структурной, информационной и алгоритмической избыточности, а также средств контроля и диагностики информационных отказов и нарушений. Особую значимость средства парирования информационных отказов имеют для автономных систем, погрешности которых являются нестационарными и с неизбежностью приводят к информационным отказам в случае несвоевременного проведения корректирующих процедур.

Изложенная концепция позволяет уточнить традиционно используемый на практике подход к оценке надежности ИС, однако более правильно рассматривать сказанное лишь как предложения по дополни-

тельной оценке эффективности ИС. Необходимо отметить еще одно важное следствие обсуждаемого подхода: он позволяет более корректно, нежели в известных методах, ставить и решать задачу контроля и диагностики ИС, поскольку модель контролируемого процесса оказывается описанной более точно.

В заключение кратко прокомментируем введенный понятийный ряд. Прежде всего, отметим, что в разбиении всех отказов ИС на два класса – аппаратные и информационные – есть определенная доля условности. В результате граница между этими классами оказывается нечеткой. Эта нечеткость не является привнесенной, а следует, в частности, из существующей нечеткости границы между понятиями «критический дефект» и «малозначительный дефект». Один и тот же дефект в разных приложениях ИС и разными разработчиками может быть отнесен к разным классам. Иллюстрацией нечеткости используемой на практике терминологии могут служить понятия «сбой» и «отказ». Ясно, что одно из отличительных свойств сбоя – «кратковременность» – является нечетким.

### 2.8.2. 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. 2.19, а), во втором – на основе рабочих воздействий в процессе функционирования системы (подсистемы) по прямому назначению (рис. 2.19, б).

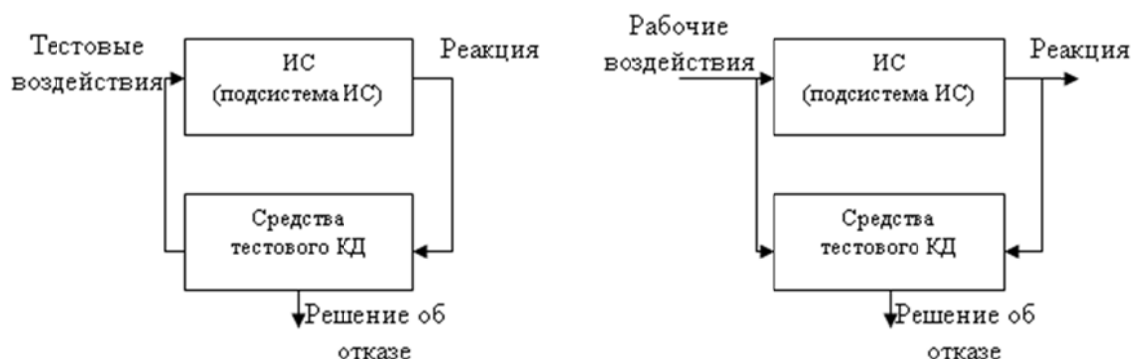


Рис. 2.19. Блок-схемы тестового (а) и функционального (б) КД

Общие правила построения тестовых воздействий для любого устройства состоят в следующем:

- описывается класс отказов устройства  $E = \{e_i \mid i=1, N\}$ , 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 неисправное устройство – выходную последовательность  $\overline{z_i}$ , причем  $z_i \neq \overline{z_i}$ .

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  $\varphi$  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 ИС.

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 ее. При этом могут применяться разнообразные методы редукции моделей [2.3]. 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.

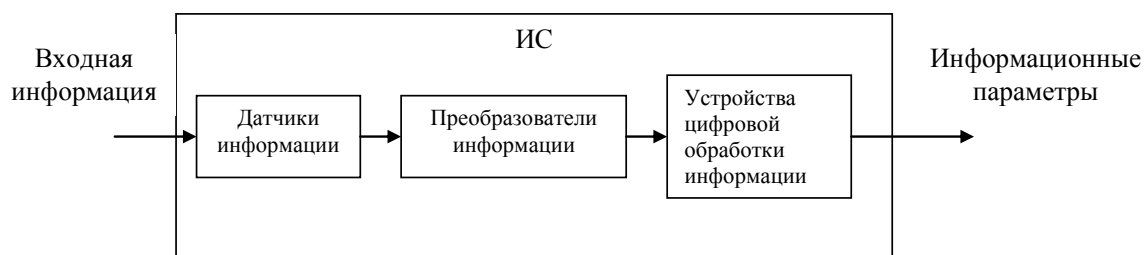
При третьем подходе решение задачи КД осуществляется путем такого синтеза средств контроля и диагностики (введения избыточности), в результате которого между выходами объекта и средств КД возникают аналитические соотношения (контрольные условия, соотношения паритета). Проверка этих соотношений и составляет 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 ИС. Обобщенно структуру ИС можно представить, как состоящую из трех последовательно включенных компонентов: датчиков информации, преобразователей информации из аналоговой формы в цифровую и устройств цифровой обработки информации (рис. 2.20).

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. 2.15). Тогда приведенная на рис. 2.20 структура соответствует подсистеме ИС. При корректном построении системы КД ИС все компоненты ИС должны быть охвачены средствами КД. Рас-

смотрим возникающие при этом проблемы. На практике наиболее эффективные варианты технической реализации решения задачи КД удается 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 ИС. 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.



*Рис. 2.20. Компоненты информационной системы*

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. 2.21 поясняется роль функциональных средств КД (СКД) комплексного уровня в работе ИС, где информационные подсистемы представлены тремя ИП.

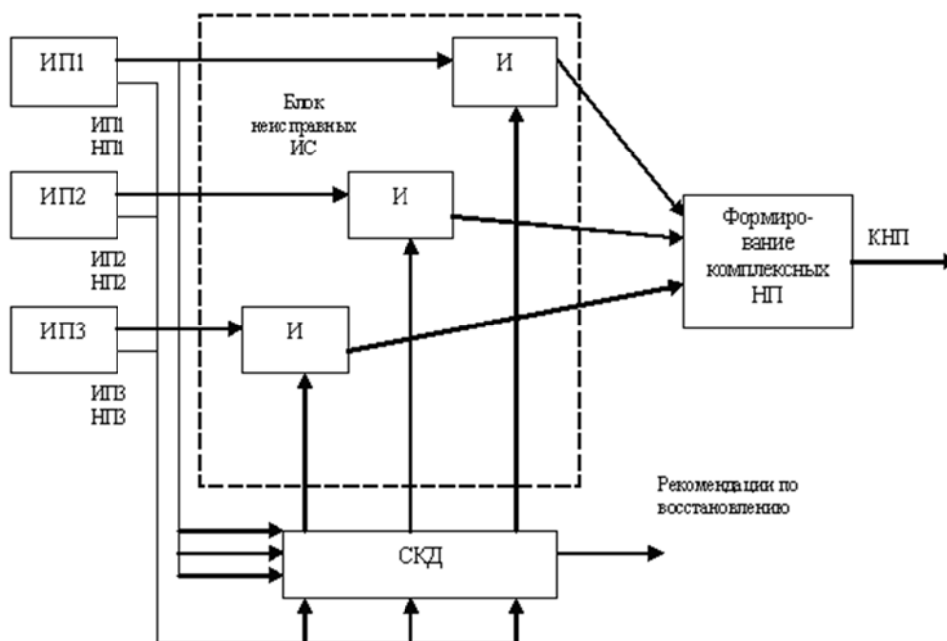


Рис. 2.21. Роль СКД в функционировании ИС

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 комплекс-



ных информационных параметров. Кроме того, для отказавшей ИП указывается адекватная процедура ее восстановления. На рисунке 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 проектируются эти средства 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 [2.3].

## **2.9. Заключение**

1. Даны основные метрологические характеристики ИС, предназначенные для определения результатов измерения, определение чувствительности к влияющим величинам и оценки динамических характеристик ИС. Предложена классификация погрешностей (систематических, случайных, грубых) ИС по таким основаниям, как закономерность проявления, причины возникновения и характер взаимодействия со средой ИС, и в этой связи рассмотрены погрешности ИС: инструментальные, методические, модели, классификации, внешние, энергетические и субъективные; показано, что инструментальные погрешности делятся на статические (основные и дополнительные), динамические и взаимодействие ИС ОР.
2. Рассмотрены вопросы метрологической проверки ИС, реализующие две схемы непосредственного сличения проверяемой образцовой ИС (с одним или двумя датчиками). Предложена методика исследования ИС.

## **Контрольные вопросы к разделу 2**

- 2.1. Метрология, метрологическое обеспечение ИС.
- 2.2. Метрологические характеристики ИС.
- 2.3. Понятие погрешности измерений.
- 2.4. Классификация погрешностей.
- 2.5. Виды распределения случайных величин;
- 2.6. Оценка статистических характеристик погрешностей ИС.

- 2.7. Основные этапы измерительных технологий.
- 2.8. Примеры взаимодействия датчиков с объектом исследования.
- 2.9. Поверка ИС.
- 2.10. Отказы и надежность ИС.
- 2.11. Особенности контроля и диагностики ИС.

## **Литература к разделу 2**

- 2.1. Системы технического зрения: справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др. // Под. общей редакцией В.И. Сырямкина, В.С. Титова. – Томск, 1992. – 367 с.
- 2.2. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений (ГОСТ 8ю009–84). – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 150 с.
- 2.3. Дмитриев С.П. и др. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004.
- 2.4. Основы метрологии и электрические измерения / Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. и др. // Под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
- 2.5. Солопченко Г.Н. Курс лекций «Метрология, стандартизация и сертификация».  
[http://www.ii.spb.ru/2005/ins\\_inn\\_material/baza\\_0/list\\_manuals\\_and\\_publications.pdf](http://www.ii.spb.ru/2005/ins_inn_material/baza_0/list_manuals_and_publications.pdf).
- 2.6. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

## 3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МЕХАТРОНИКИ

### 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 видеоинформации. Системы технического зрения (СТЗ) состоят из датчиков оптической информации (ДОИ) и средств обработки и анализа изображения и других устройств. Средства обработки и анализе 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  $ДИ_1 \dots ДИ_д$  (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.

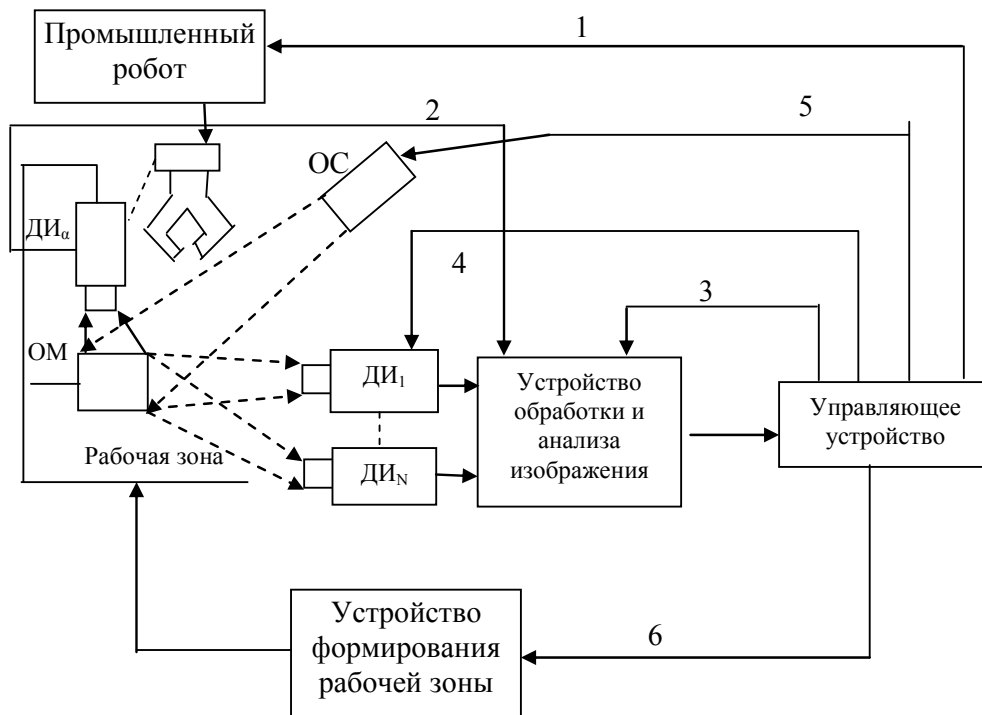


Рис. 3.1. Структурная схема технического зрения промышленного робота

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 [3.1].

### 3.1.2. Классификация СТЗ

При классификации СТЗ среди многочисленных оснований (признаков) их деления выберем десять [3.1]: 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).

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.

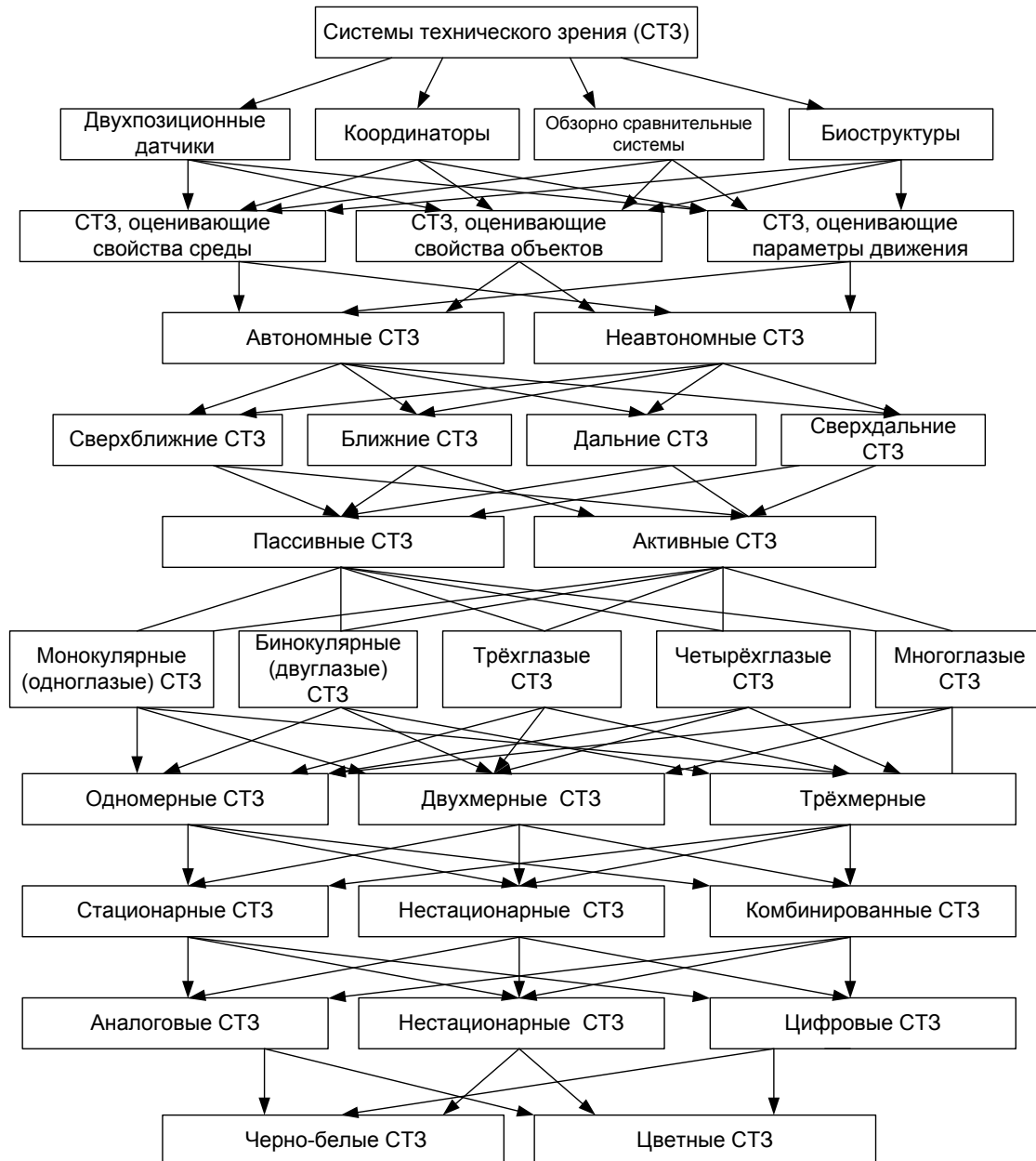


Рис. 3.2. Классификация СТЗ

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 видеоинформации определяют координаты ОМ. По типу используемого датчика изображения координаторы делятся на СТЗ, используемые информационные линейки и поля (ИЛП) и телевизионные системы (ТС). Основным 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 свето-маяки, 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. Однако с их помощью можно решать довольно сложные задачи: распознавание формы, определение координат и ориентации объекта манипулирования, контроль поверхности объекта и др. [1.1–1.4]. 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 [3.1, 3.2.]. 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.

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 видеоматриале. 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.



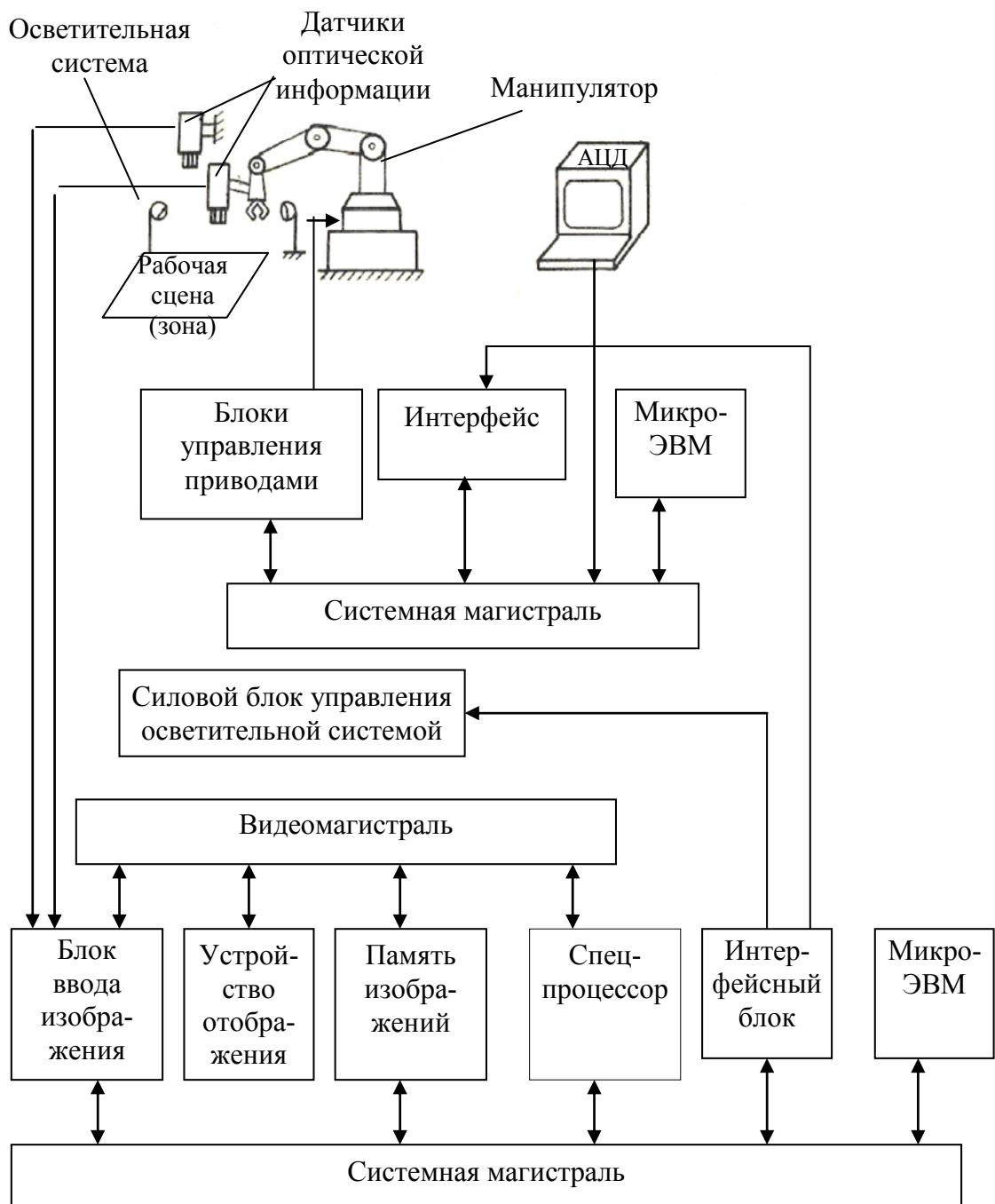


Рис. 3.3. Структура системы технического зрения и системы управления промышленным роботом

### 3.1.4. Требования, предъявляемые СТЗ

Техническое задание на разработку СТЗ робота должно содержать ряд специфических требований: 1) к уровню «интеллекта», т. е. к 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 временны-

ми 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 робота 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 ДТИ не должно препятствовать производственно-допустимым подходам манипулятора и инструмента;

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

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

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, ДОИ, осуществляется выбор количества и компоновочной схемы взаимного расположения ДОИ, 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, удовлетворяющие стандартам ГСП (после доработки и утверждение 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 пи-

тания, 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 ограничения на выбор результирующего времени реакции системы СТЗ-СУР-привод ПР  $T_{\Sigma}$  на изменение управляемого параметра:

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

где  $M$  – показатель колебательности,  $\omega_c$  – 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  $\lambda$  определяет интенсивность потока отказов во времени. Для системы, содержащей  $n$  элементов с интенсивностями отказов  $\lambda_i$ , ( $i=1, \dots, n$ ), результирующая интенсивность отказов

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

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 к 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, обеспечивающие минимальные затраты на создание и эксплуатацию СТЗ при заданной её точности работы.

### **3.1.5. Алгоритмы обработки зрительной информации в СТЗ**

#### *3.1.5.1. Обобщенный алгоритм обработки зрительной информации*

Рассматривая алгоритмы процесса обработки зрительной информации в СТЗ, изложенные в [3.1, 3.2], представим обобщенный алгоритм следующей блок-схемой (рис. 3.4), 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 видеоинформации 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 не достаточно 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 би-

нарным, 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); перемещение объектов относительно датчиков информации (и наоборот) для получения дополнительной полезной информации; организация 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.).

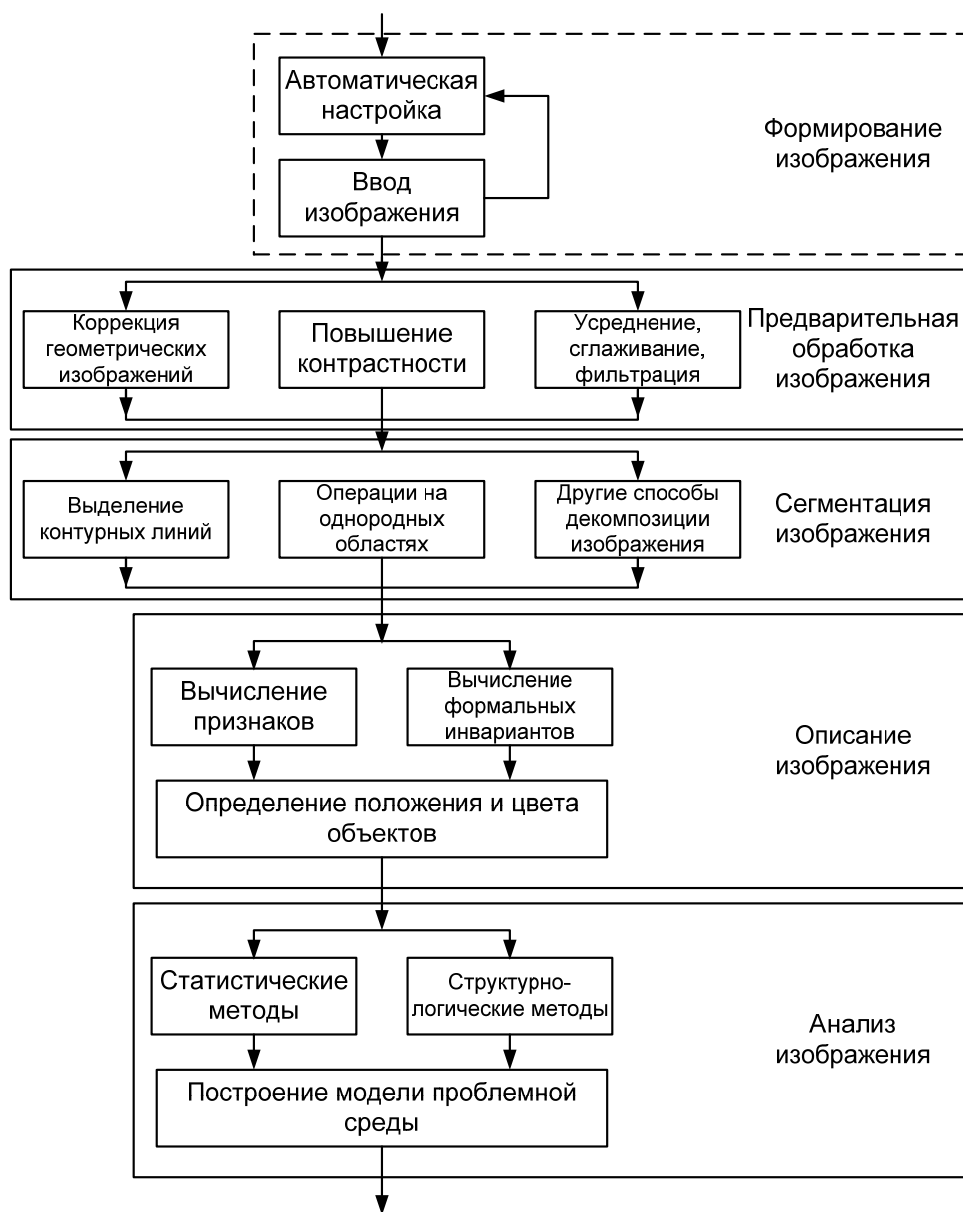


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма обработки зрительной информации в СТЗ

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

### 3.1.5.2. Формирование изображений

Под изображением рабочей сцены будет пониматься [3.1, 3.2] «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 настройки 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 методика 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 аналогоцифровых 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 [2.28]. 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 (полутонным).

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 ме-



тод 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 [2.16]

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

или

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

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  $T$  [2.15]. 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

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

где  $s_k$  – множество точек, в которых уровень яркости отвечает числу  $k$  градаций яркости [2.30].

В [3.2] подбирались постоянные пороги по яркости  $T$  и градиенту  $\epsilon$ , но бинаризация осуществлялась согласно условию

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

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 соответственно 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, в [2.81] производится усреднение яркости по окну размером 4 x 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.

В [2.31] вычисляются величины

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

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

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

Выбирая локальные пороги для изображений, разбитых (тем или иным способом) на блоки (например, участки с двумя четко выраженными пиками гистограммы яркости), можно далее провести пространственную интерполяцию их, 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 квантование, 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.

### 3.1.5.3. Предварительная обработка изображений

Основная цель предварительной обработки изображений – удаление шумов (сглаживание, фильтрация), улучшение контрастности (преобразование шкалы яркости, обострение), а также коррекции 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 [2.66] 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 изображения, вводимого в ЭВМ с видеосенсора, основанный на следующей процедуре [2.15]:

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 одно-тоновой 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 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  $a \times b$ :

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

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  $\left[ (\sqrt{ab} - 1) / 2 \right]$  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 максимального 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:

$$P_x = A_0 + A_1 x_K + A_2 x_K^2 + A_3 x_K^3 + A_4 x_K^4 + A_5 x_K^5,$$

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 (метод определителей) и методу Гаусса (методу единственного деления) к числу операций по проводимой методике (приводится в строке «выигрыш общий»).

Судя по таблице, выигрыш по отношению к высокоэффективному методу Гаусса общий выигрыш составляет 3.5–3.1 раза. Кроме того, следует отметить повышение устойчивости вычислительного процесса в связи со снижением максимальной величины показателей степеней относительных координат.

Таблица 3.1

*Расчетные соотношения для вычисления коэффициентов полиномов*

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

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

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.

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,  $3 \times 256$ , 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. Его 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 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 пространственного спектра, описывающего изображение. Для синтеза фильтра, подавляющего высокочастотные составляющие пространственного спектра, можно воспользоваться, например, функциями типа

$$H(l, m) = [\cos(\pi l) \cos(\pi m)]^v,$$

где  $v$  – целое положительное число, или

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

$L, M$  – 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)

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

назначаются положительный  $T_P > 0$  и отрицательный  $T_{II} < 0$  пороги и используется следующая логика: если  $T_{II} < L(i, j) < T_P$ , то  $G(i, j)$  не изменяется, при  $L < T_P$  в точке  $(i, j)$  «0» заменяется на «1», при  $L < T_{II}$  «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 больших шумовых структур с нулевыми значениями яркости меняется порядок сжатия и расширения областей. Обобщение этого метода на случай многоградационных изображений 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  $G(i, j)$  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, в выражении  $G + (G - \bar{G})$  низкие частоты остаются без искажения, а роль высоких усиливается.

#### 3.1.5.4. 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 [3.1, 3.2]. Наиболее распространенные методы сегментации базируются на выявлении одного из двух основных свойств изображения – различия и сходства. В соответствии с этим рассмотрим кратко два ос-

новых 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  $G(i, j)$ . 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 четырех 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 Хюккеля 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  $\tau$ . 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:

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

В этих изображениях можно описать известные нелинейные локальные операторы:

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

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 вели-

чины 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

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

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

Для порогового ограничения с целью 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 (2.41):

- 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  $-M \leq m \leq M, -M \leq l \leq M, M, \tau, \Theta, a, b$  – 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 неравен-

ство 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 [3.1, 3.2] 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.

При реализации этого алгоритма контурные точки локализуются с погрешностью  $\delta$ , определяемой величиной сдвига и заведомо меньшей шага  $H$  грубой матрицы (рис. 3.5.). Практически такие сдвиги можно реализовать несколькими способами, наиболее перспективным из которых представляется аппаратное управление синхронизацией считывания видеосигнала телекамеры по отношению к развертке.

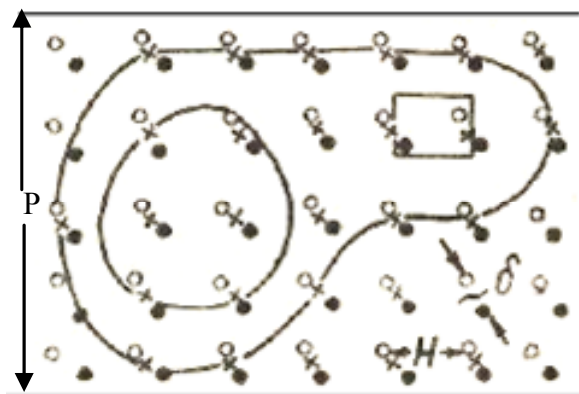


Рис. 3.5. Определение контура изображения объекта:

○ – положение отсчетов до «сдвига», • – положение отсчетов после «сдвигов»,  
× – «машинная» контурная точка

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 быстродействия 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 яркости) 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. 3.6. На рис. 3.6, *а* имеются три области (внутренняя белая часть кольца, черное кольцо и внешняя белая область), соответствующие интуитивным представлениям и всем принятым определениям связности. Однако при рассмотрении рис. 3.6, *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»).

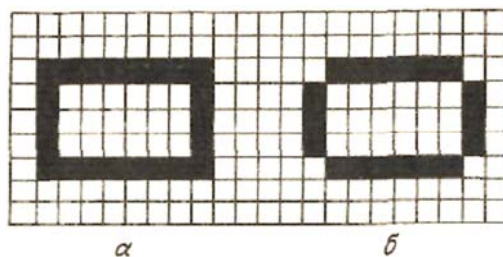


Рис. 3.6. Определение связности элементов изображения

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 элементарные 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 своим 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.

### *3.1.5.5. Описание изображений*

Этот этап представляет собой преобразование изображения в совокупность его количественных (числовых) и (или) качественных (логических, вербальных) характеристик [3.1, 3.2]. 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 удается 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. 3.7. приведен пример цепного кода контурной линии, каждая позиция которого указывает в соответствии с приведенными обозначениями возможные направления перехода к соседнему элементу при прослеживании линии.

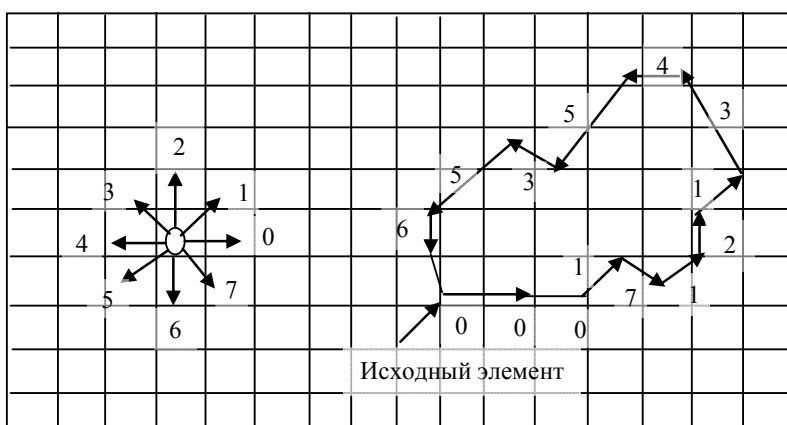


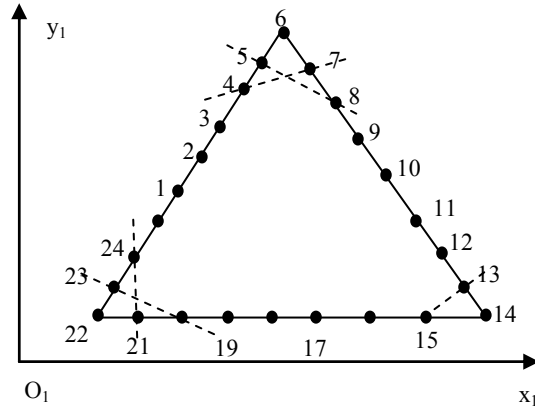
Рис. 3.7. Пример цепного кода 0001712133455356

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.

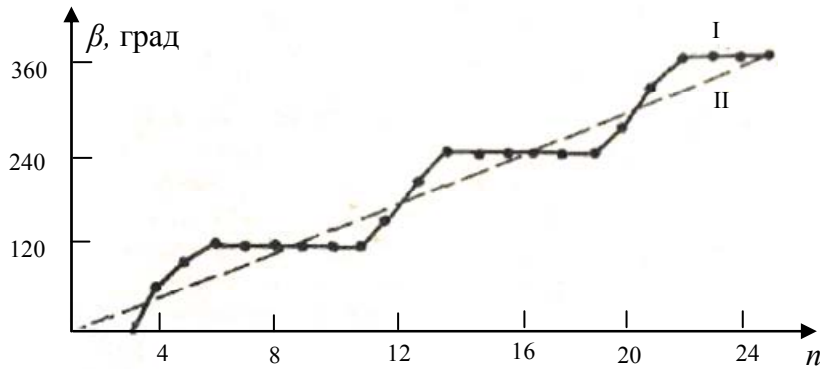
Суть метода секущих контура заключается в следующем. Сначала формируется реализация  $\beta'(n)$ , соответствующая развертке контура изображения ОМ. Особенности построения этой реализации видны из рис. 3.8. Функция  $\beta'(n)$  строится за два обхода изображения контура ОМ. Во время формирования датчиком информации при подходе считывающего луча (ячейки) к краю изображения объекта (рис. 3.8, а) выбирается любая точка (например, точка 1), которая принимается за исходное (нулевое) положение. Устанавливается число  $n$  элементов разложения контуров изображения ОМ, определяемое разрешающей способностью ДООИ. Затем строятся прямые линии (секущие контура), характеризующиеся угловым коэффициентом:

$$K = \frac{y_n + y_{n+m}}{x_n - x_{n+m}}, \quad (3.1.)$$

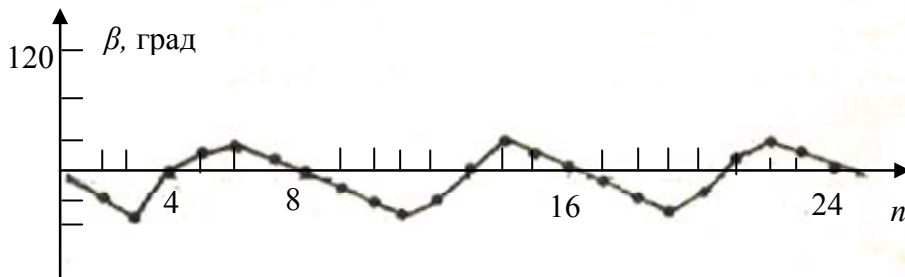
где  $x_n, x_{n+m}, y_n, y_{n+m}$  – координаты точек контура в прямоугольной системе координат, связанной с плоскостью накопителя ТИ;  $m$  – постоянное число элементов (дискретов) разложения контура, соответствующее выбранной длине секущей контура.



а)



б)



в)

Рис. 3.8. Пример кодирования изображения методом секущих контура

Углы между предыдущей и последующей прямыми

$$\beta_i = \arctg \frac{k_T - k_{\text{пр}}}{1 + k_{\text{пр}}k_T},$$

где  $k_T, k_{пр}$  – коэффициенты, определяемые по формуле (3.1) и соответствующие угловым коэффициентам предыдущей и текущей прямых. Производится накопление следующих сумм

$$\beta_n = \sum_{i=1}^n \beta_i.$$

В результате формируется специфичная одномерная развертка контура изображения ОМ (рис. 3.8, 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, рис. 3.8, б).

$$K_{(n)} = k_i + M, M = \frac{360^\circ}{n}, i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

где  $k_i$  определяется из условия, что  $k_{i=0} = 0$ , а  $k_{i=1} = M, k_{i=2} = M + M, \dots$

Функция  $\beta(n)$  (рис. 3.8, в) является информативной частью полученной одномерной реализации, а функция  $K_{(n)}$  – неинформативной частью, которая удаляется путем соответствующего вычитания:

$$\beta'(n) = \beta(n) - K(n).$$

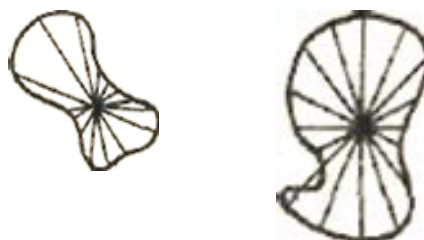


Рис. 3.9. Гадограф

Задача построения гадографа (рис. 3.9.) 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.

В случае растрового изображения построение выполняется в процессе обхода связной области вдоль контура по следующему алгоритму.

1. Вычисление длины радиуса-вектора и его углового положения 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. 3.10. 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. 3.10. 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 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 класси-

фикации 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 поверхности с ее границей), углом между максимальным и минимальным радиусами-векторами, количеством изломов границы, координатами геометрического центра, уравнением плоскости, содержащей грань (в случае аппроксимации многогранниками), списком «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 периметр, 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) им света. Существуют и другие (итерационные) способы определения формы по полутонам.

Широко используемыми геометрическими признаками служат коэффициенты формы объекта  $k_1 \sim S / P^2$ ;  $k_2 \sim R_{\max} / R_{\min}$ ;  $k \sim R_{\max} / P$ ;

$k_4 \sim R_{cp} / R_{min}$ . 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 изменениям 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 координаты  $x_c$ ,  $y_c$  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.

Рассмотрим кратко особенности описания цветных изображений. Цветные изображения, обрабатываемые в СТЗ, можно описывать, используя определенные для каждого элемента цветные координаты  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , 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 цветных 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 цветовых компонент, отличающийся простотой по сравнению со способом совместного квантования цветовых компонент. Верность воспроизведения цветового 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 системы кодирования цветных изображений на основе преобразования системы координат цвета. Эномото и Шибата предложили другой метод кодирования цветного изображения, согласно которому преобразование применяется к полному цветовому телесигналу, яркостные и цветностные координаты последнего объединяются методом частотного перемежения. Для использования кодирования с предсказанием существует также два способа: полного цветового сигнала и координат цвета. Одним из наиболее распространенных применений информации о цвете является выделение цветовых контуров, которое можно производить тремя способами: 1) по общему перепаду яркости; 2) по перепаду яркости на каждой из трех цветовых 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 объектов на основе вычислительных признаков (в том числе и цветовых, которые активно используются) с последующим построением модели.

#### *3.1.5.6. 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  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  – вектор, представляющий некоторый объект в  $n$ -мерном пространстве призна-

ков. 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  $\omega_i$  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 изображения 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 совокупностями. 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 [2.56]. В СТЗ нашли применение различные структурно-синтаксические методы (например, в СТЗ контроля печатных плат (см. раздел 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, отношения 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. В разделе описан так называемый «алгоритм пирамидальной архитектуры», реализующий концепцию интеллектуального восприятия и характеризующийся иерархической структурой данных для представления изображений.

### 3.1.6. Алгоритмы анализа цветных и объемных изображений в СТЗ

Положение ОР в пространстве на основе обработки изображений, снимаемых с двух телевизионных камер, оценивается известными выражениями. Одной из основных проблем при использовании подобных систем является обнаружение идентичных точек, для которых измеряется параллакс. В этой связи весьма перспективна корреляционная обработка стереоизображений. Введем системы координат (рис. 3.11)  $XOYZ$ ,  $X_1O_1Y_1Z_1$ ,  $X_2O_2Y_2Z_2$ , связанные соответственно с плоскостью рабочей зоны, с первым и вторым ДТИ (оси  $O_1X_1$ ,  $O_2X_2$  первого и второго ДТИ и параллельны базису съемки).

На рис. 3.11. 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  $\Delta x_1$ ,  $\Delta y_1$  и вторым (правым) ДТИ с координатами  $\Delta x_2$ ,  $\Delta y_2$ . Связь между координатами этих точек находится известным выражением

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 - p(\Delta x_2, \Delta y_2), \quad (2.54)$$

где  $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$  – функция продольных параллаксов, которая взаимнооднозначно 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

$$p = \arg \max_p J(p), \quad (3.2)$$

где – целевая функция, синтезированная из оценок мер схожести сравниваемых участков первого и второго изображения. Функция  $J(p)$  представляет корреляционную функцию

$$J(\bar{p}) = \int \tilde{F}_1(x_1, y_1) \tilde{F}_2(x_2, y_2, \bar{p}) dx dy, \quad (3.3)$$

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.

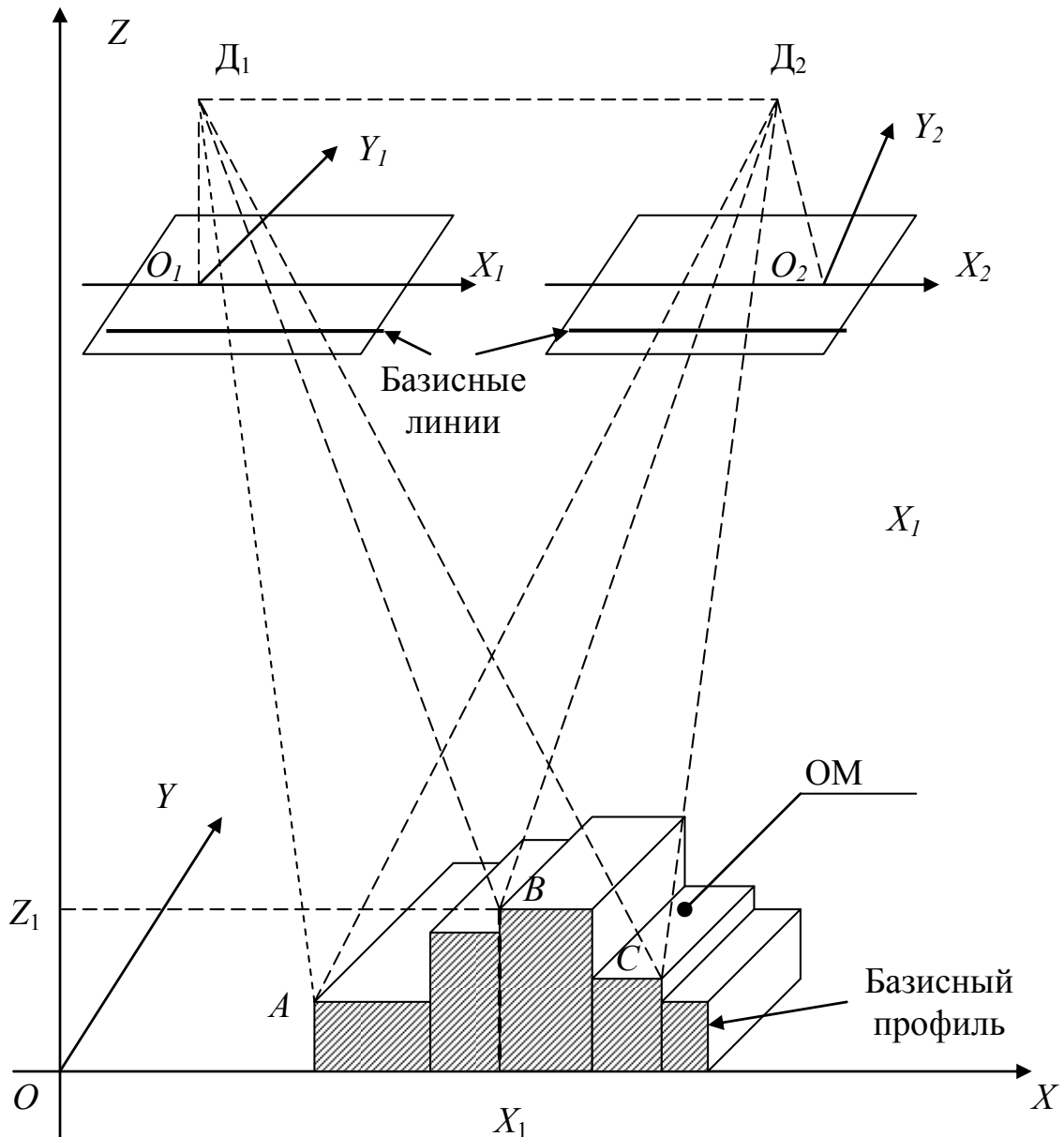


Рис. 3.11. Корреляционные основы стереоизмерений

Таким образом, корреляционный анализ стереоизображения состоит из следующих операций: формирование первого и второго ТИ, формирование ВКФ, вычисление смещения первого ТИ относительно вто-

рого 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. 3.12.). 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 ДТИ<sub>1</sub>, ДТИ<sub>2</sub>, ДТИ<sub>3</sub>. Положение ОР (центр тяжести, то есть положение точки  $A$ ) в этой системе координат определяется величинами  $\Delta x_A$ ,  $\Delta y_A$ ,  $\Delta z_A$ ; введем следующие обозначения:  $l_1, l_2, l_3$  – расстояние от соответствующих ДТИ<sub>1</sub>, ДТИ<sub>2</sub>, ДТИ<sub>3</sub> до ОР;  $l'_1, l'_2, l'_3$  – расстояние от ДТИ<sub>1</sub>, ДТИ<sub>2</sub>, ДТИ<sub>3</sub> до соответствующих осей координат.

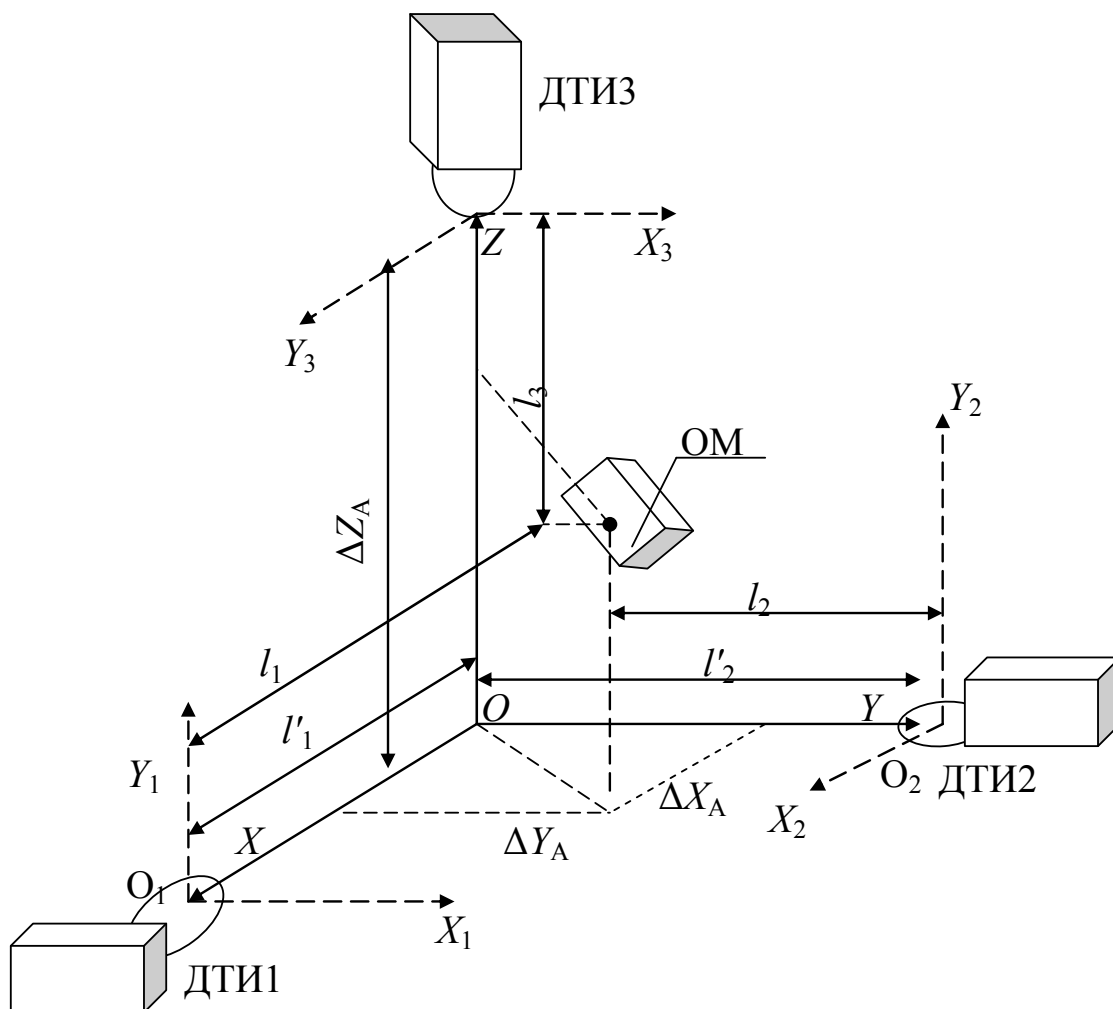


Рис. 3.12. Корреляционные основы измерения пространственного положения ОР с использованием трёх ДТИ

В общем виде положение ОР можно определить по анализу трех ВКФ, описываемых следующими выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1, (\xi_1, \eta_1, \alpha_1) = \int_{S_1} F_1(x_1, y_1) F_1(x'_1, y'_1) ds_1; \\ x_1 = (x'_1 - \xi'_1) \cos \alpha_1 + (y'_1 - \eta_1) \sin \alpha_1; \\ y_1 = (y'_1 - \eta_1) \cos \alpha_1 - (x'_1 - \xi_1) \sin \alpha_1; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_2, (\xi_2, \eta_2, \alpha_2) = \int_{S_2} F_2(x_2, y_2) F_2(x'_2, y'_2) ds_2; \\ x_2 = (x'_2 - \xi'_2) \cos \alpha_2 + (y'_2 - \eta_2) \sin \alpha_2; \\ y_2 = (y'_2 - \eta_2) \cos \alpha_2 - (x'_2 - \xi_2) \sin \alpha_2; \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_3, (\xi_3, \eta_3, \alpha_3) = \int_{S_3} F_3(x_3, y_3) F_3(x'_3, y'_3) ds_3; \\ x_3 = (x'_3 - \xi'_3) \cos \alpha_3 + (y'_3 - \eta_3) \sin \alpha_3; \\ y_3 = (y'_3 - \eta_3) \cos \alpha_3 - (x'_3 - \xi_3) \sin \alpha_3; \end{array} \right.$$

где  $F_1(x_1, y_1)$ ,  $F_2(x_2, y_2)$ ,  $F_3(x_3, y_3)$  – ТИ, формируемые соответствующими ДТИ<sub>1</sub>, ДТИ<sub>2</sub>, ДТИ<sub>3</sub>;  $F'_1(x'_1, y'_1)$ ,  $F'_2(x'_2, y'_2)$ ,  $F'_3(x'_3, y'_3)$  – ЭИ, подготовленные при съемке с соответствующих ДТИ<sub>1</sub>, ДТИ<sub>2</sub>, ДТИ<sub>3</sub>;  $S_1, S_2, S_3$  – площади коррелируемых изображений. Следует отметить, что при совмещении ТИ и ЭИ не только по угловой и линейным координатам, но и по масштабу выражения (3.4) еще более усложняются.

Рассмотрим особенности оценки местоположения объекта при использовании различного числа и комбинации ДТИ (то есть КЭС). Например, если используются три КЭС (ДТИ расположены так, как показаны на рис. 2.12), то координаты ОР определяются

$$\Delta X_A = \Delta \xi_2 = \Delta \xi_3, \Delta Y_A = \Delta \xi_1 = \Delta \xi_3, \Delta Z_A = \Delta \eta_1 = \Delta \eta_2. \quad (3.5.)$$

Если применяются только две КЭС (например, КСТ31 и КСТ32 и соответственно ДТИ1 и ДТИ2), то координаты ОР находятся

$$\Delta X_A = \Delta \eta_2; \Delta Y_A = \Delta \xi_1; \Delta Z_A = \Delta \eta_1 = \Delta \eta_2. \quad (3.6.)$$

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 КСТЗ<sub>1</sub> и КЭС<sub>3</sub> (с ДТИ<sub>1</sub> и ДТИ<sub>3</sub>) искомые координаты определяются следующим образом:

$$\Delta X_A = \Delta \eta_3; \Delta Y_A = \Delta \xi_1 = \Delta \xi_3; \Delta Z_A = \Delta \eta_1. \quad (3.7.)$$

Если определяются КЭС только величины  $\Delta \eta_1$ ,  $\Delta \xi_2$ ,  $\Delta \xi_3$  то выражение (2.60) упрощаются до вида

$$\Delta X_A = \Delta \eta_3; \Delta Y_A = \Delta \xi_3; \Delta Z_A = \Delta \eta_1.$$

В случае использования КЭС<sub>2</sub> и КЭС<sub>3</sub> (с ДТИ<sub>2</sub> и ДТИ<sub>3</sub>), координаты ОР находятся

$$\Delta X_A = \Delta \xi_2 = \Delta \eta_3, \Delta Y_A = \Delta \xi_3, \Delta Z_A = \Delta \eta_2. \quad (3.8.)$$

В формулах (3.6), (3.7.), (3.8)  $\Delta \xi_1$ ,  $\Delta \xi_2$ ,  $\Delta \xi_3$ ,  $\Delta \eta_1$ ,  $\Delta \eta_2$ ,  $\Delta \eta_3$  представляют собой координаты главного максимума соответствующих ВКФ.

Расстояния  $l_1, l_2, l_3$  до ОР определяются следующими выражениями (рис. 3.13.):

$$l_1 = \frac{l'_2 - \Delta x}{\cos \psi_x}; l_2 = \frac{l'_2 - \Delta y}{\cos \psi_y}; l_3 = \frac{l'_3 - \Delta z}{\cos \psi_z};$$

$$\psi_x = \arccos \frac{l'_1 - \Delta x}{l_1}; \psi_y = \arccos \frac{l'_2 - \Delta y}{l_2}; \psi_z = \arccos \frac{l'_3 - \Delta z}{l_3}, \quad (3.9.)$$

где  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$  – угол между направлением на и соответствующими осями системы координат  $XOY2$  (на рис. 3.13. не показаны). Причем

$$l_1 \sim \Delta M_y, l_2 \sim \Delta M_z, l_3 \sim M_x,$$

где  $\sim$  – знак пропорциональности;  $\Delta M_y, \Delta M_z, \Delta M_x$  – изменение масштаба ВКФ, пропорциональное изменению ТИ относительно исходного ЭИ.

В общем виде цвет (Ц) изображения может быть описан следующим цветовым уравнением [458,502]:

$$\text{Ц} = T_1[r_{ij}] + T_2[g_{ij}] + T_3[b_{ij}], \quad (3.10.)$$

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 (3.10) 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.

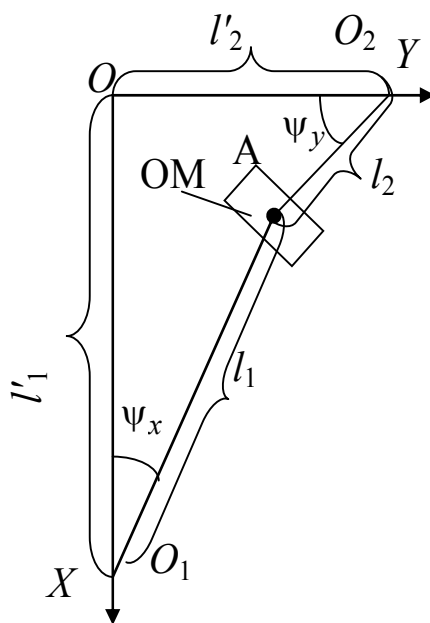


Рис. 3.13. Пример измерения положения  $OP$  в плоскостях  $XOY$

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  $N_{\Pi} \cdot N_{\Pi}$ . 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 прочее.

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

$$\{X, R, G, B, L\}_k, \quad (3.11)$$

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  $l', m', n_{III}$ :

$$\begin{aligned} R &= f_r(l', m', n_{III}); \\ G &= f_g(l', m', n_{III}); \\ B &= f_b(l', m', n_{III}), \end{aligned} \quad (3.12)$$

где  $l'$  – искомая характеристика;  $m'$  – мешающий параметр;  $n_{III}$  – случайный шум.

Величины  $l', m', n_{III}$  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  $n_{III}$ . 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 и 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:

$$g_{ij} = [G]_{ij} = 0, b_{ij} = [B]_{ij} = 0, \quad (3.13)$$

то есть

$$f_g(l', m', n_{III}) = 0; f_b(l', m', n_{III}) = 0; f_r(l', m', n_{III}) \neq 0.$$

В этом случае состояния  $A_k, k = \overline{1, 5}$  системы сравнения цветных изображений могут быть определены с помощью следующих наборов:

$$A_k = \{x, r, 0, 0, 1\}_k, \quad (3.14)$$

где  $0$  – массив, содержащий лишь нулевые элементы, то есть

$$A_k = \{x, r, l\}_k.$$

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:

$$\begin{aligned} A_k &= \{X, 0, G, 0, L\}_k = \{X, G, L\}_k; \\ A_k &= \{X, 0, 0, B, L\}_k = \{X, B, L\}_k; \\ A_k &= \{X, 0, 0, 0, L\}_k = \{X, L\}_k. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Рассмотрим основные этапы корреляционного сравнения цветных изображений. Процедуры предварительной обработки в общем случае могут быть представлены в виде системы уравнений

$$A_1[R_0] = R_1; \quad A_1[G_0] = G_1; \quad A_1[B_0] = B_1,$$

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:

$$r_{1,ij} = A_1[r_{0,ij}]; \quad g_{1,ij} = A_1[g_{0,ij}], \quad (3.16)$$

где  $i, j = n'$ ,  $r_{1,ij}$ ,  $g_{1,ij}$ ,  $b_{1,ij}$  – элементы, находящиеся пересечении  $i$ -ой строки и  $j$ -ого столбца соответствующего массива  $R$ ,  $G$ ,  $B$ ;  $n'$  – целое число, характеризующее количество элементов массива изображения.

Если ввести обозначение элемента массива соответствующего цвета

$$R_1(i, j) = r_{1,i,j}, \quad G_1(i, j) = g_{1,i,j}, \quad B_1(i, j) = b_{1,i,j}, \quad (3.17)$$

то соотношения (2.70) можно переписать в следующем виде:

$$r_{1,ij} = [A'_1(R_0)]_{i,j}; \quad g_{1,ij} = [A'_1(G_0)]_{i,j}; \quad b_{1,ij} = [A'_1(B_0)]_{i,j}, \quad i, j = n',$$

где  $A'$  соответственно, операторы функций  $R_0, G_0, B_0$ , определенные в некоторой окрестности пиксела  $i, j$  или на множестве массивов, характеризующих цвет. В соответствии с вышеизложенным представим некоторые известные алгоритмы предварительной обработки изображений



([236,343] применительно для обработки цветных изображений. Например, алгоритм усреднения изображения по окружности будет

$$\begin{aligned} g_{1,i,j} &= \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} g_{0,l,m}; \\ r_{1,i,j} &= \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} r_{0,l,m}, \end{aligned} \quad (3.18.)$$

$$b_{1,i,j} = \sum_{(l,m) \in S(i,j)} \alpha_{l,m} b_{0,l,m}; \quad l, m = n''$$

$S(i, j)$  – множество координат точек в окрестности пиксела  $(i, j)$ ,  $n''$  – положительное число,  $\alpha$  – диаметр окружности.

Обозначив через  $N_0$  общее число точек в окрестности пикета  $(i, j)$  и приняв  $\alpha_{l,m} = \frac{1}{N_0} \forall_{l,m} \in S(i, j)$ , получим алгоритм скользящего среднего для цветных изображений

$$\begin{aligned} r_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} * \sum_{r_0(l,m) \in S(i,j)} r_{0,l,m}; \\ g_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} * \sum_{g_0(l,m) \in S(i,j)} g_{0,l,m}; \\ b_{1,i,j} &= \frac{1}{N_0} * \sum_{b_0(l,m) \in S(i,j)} b_{0,l,m}. \end{aligned} \quad (3.19.)$$

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:

$$\begin{aligned} r_{1,i,j} &= \max_n \sum_{(l,m) \in s(i,j)} r_{0,l,m} \quad ; \quad g_{1,i,j} = \max_n \sum_{(l,m) \in s(i,j)} g_{0,l,m} \quad ; \\ b_{1,i,j} &= \max_n \sum_{(l,m) \in s(i,j)} b_{0,l,m} \quad , \end{aligned} \quad (3.20.)$$

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:

$$\begin{aligned}
r_{1,i,j} &= A_1[r(0,i,j) \dots r(0,i,j)_k]; \\
g_{1,i,j} &= A_1[g(0,i,j) \dots g(0,i,j)_k]; \\
b_{1,i,j} &= A_1[b(0,i,j) \dots b(0,i,j)_k];
\end{aligned}
\tag{3.21}$$

или

$$\begin{aligned}
r_{1,i,j} &= \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k r(o,i,j)l; \\
g_{1,i,j} &= \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k g(o,i,j)l; \\
b_{1,i,j} &= \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k b(o,i,j)l,
\end{aligned}$$

где  $k$  – число изображений.

В (4.21) при увеличении числа  $k$  используемых изображений массивы  $k$ ,  $R_1$ ,  $G_1$ ,  $B_1$  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  $S(i,j)$  пиксела  $(i,j)$ . Предположим, что изображение представляет собой совокупность нулей и единиц. Тогда соотношения, определяющие совокупность логических операций процедуры предварительной обработки изображения, получим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
r_{1,i,j} &= E \{ r_{0,l,m} \in S(i,j) \}; \\
g_{1,i,j} &= E \{ g_{0,l,m} \in S(i,j) \}; \\
b_{1,i,j} &= E \{ b_{0,l,m} \in S(i,j) \},
\end{aligned}
\tag{3.22}$$

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:

$$J_R(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^C(x_1, y_1) F_2^R(x_2', y_2') dx dy;$$

$$J_G(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^C(x_1, y_1) F_2^G(x_2'', y_2'') dx dy;$$

$$J_B(\xi, \eta) = K_n \int_S F_1^C(x_1, y_1) F_2^B(x_2''', y_2''') dx dy,$$

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 оценивается 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:

$$\begin{aligned} & \text{Ц}_K=1, \text{ при } \text{Ц}_3=\text{Ц}_C=\text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_Г=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_R=1, J_G=J_B=0; \\ & \text{Ц}_3=1, \text{ при } \text{Ц}_K=\text{Ц}_C=\text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_Г=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_G=1, J_R=J_B=0; \\ & \text{Ц}_C=1, \text{ при } \text{Ц}_K=\text{Ц}_3=\text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_Г=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_B=1, J_R=J_G=0; \\ & \text{Ц}_\Pi=1, \text{ при } \text{Ц}_K=\text{Ц}_C=1, \text{Ц}_3=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_Г=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_R=J_B=1, J_G=0; \\ & \text{Ц}_Ж=1, \text{ при } \text{Ц}_K=\text{Ц}_3=1, \text{Ц}_C=\text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Г=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_R=J_G=1, J_B=0; \\ & \text{Ц}_Г=, \text{ при } \text{Ц}_C=\text{Ц}_3=1, \text{Ц}_K=\text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_6=0 \text{ или } J_G=J_B=1, J_R=0; \\ & \text{Ц}_6=, \text{ при } \text{Ц}_K=\text{Ц}_3=\text{Ц}_C=1, \text{Ц}_\Pi=\text{Ц}_Ж=\text{Ц}_Г=0 \text{ или } J_R=J_G=J_B=1, \end{aligned}$$

где  $\text{Ц}_K$ ,  $\text{Ц}_3$ ,  $\text{Ц}_C$ ,  $\text{Ц}_\Pi$ ,  $\text{Ц}_Ж$ ,  $\text{Ц}_Г$ ,  $\text{Ц}_6$  – соответственно уровни красного, зелёного, синего, пурпурного, желтого, голубого и белого цветов. Таким образом по сочетанию  $z$ ,  $z_r$ ,  $z$  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.

### 3.2. 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 обуславливается 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 является: 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 [3.6–3.8].

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 [3.7].

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 выработать 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 [3.8], 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. 3.14.

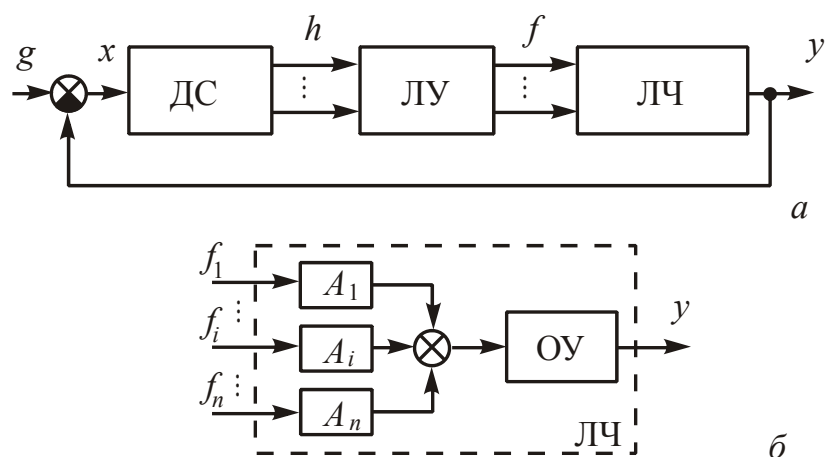


Рис. 3.14. Структурная схема:

ЛЧ – линейная часть; ЛУ – логическое устройство (однородная вычислительная среда); ДС – детектор состояния; ОУ – объект управления;

$A_i$  – заданный класс динамических корректирующих звеньев ( $i = 1, 2, \dots, n$ )

Объект управления представлен в виде

$$W_{об}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{k}{Tp + 1}, \quad (3.23)$$

где  $T$  – постоянная времени объекта управления.

Динамику рассматриваемого класса систем (рис. 3.14) относительно ошибки регулирования, когда  $n = 2$ , можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -a_2 x_2(t) - a_1 \Psi, \end{aligned} \right\} a_i > 0 \quad (i = 1, 2), \quad (3.24)$$

$$\Psi = \alpha f_1 + \beta f_2, \quad f_i \in [0, 1] \quad (i = 1, 2),$$

где  $x_1, x_2$  – фазовые координаты;  $a_i, \alpha, \beta$  – постоянные коэффициенты;  $\Psi$  – разрывной коэффициент.

Величины  $f_i$  могут принимать значения либо 0, либо 1 и формируются однородной вычислительной средой (рис. 3.15) на основе информации о знаке  $x_1(t)$  и о знаке линейной комбинации  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  по формулам

при  $h_2h_4 = 0$  (рис. 3.15, а)

$$\begin{cases} f_1 = a, \\ f_2 = b, \end{cases}$$

при  $h_2h_4 = 1$  (рис. 3.15, б)

$$\begin{cases} f_1 = b, \\ f_2 = a. \end{cases}$$

Здесь

$$\begin{aligned} a &= h_1h_3 \vee h_2h_4, b = h_2h_3 \vee h_1h_4; \\ \bar{h}_1 &= \text{sgn}(\text{sgn}(x_1) - 1), \bar{h}_2 = \text{sgn}(\text{sgn}(x_1) + 1); \\ \bar{h}_3 &= \text{sgn}(\text{sgn}(s) - 1), \bar{h}_4 = \text{sgn}(\text{sgn}(s) + 1); \\ s &= x_2(t) + c x_1(t), \end{aligned} \quad (3.25)$$

где  $h_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 4$ ) – входные переменные ОС;  $s$  – прямая переключения;  $\text{sgn}(A)$  – функция от аргумента  $A$ , принимающая следующие значения:

$$\text{sgn}(A) = \begin{cases} 1 & \text{при } A > 0, \\ 0 & \text{при } A = 0, \\ -1 & \text{при } A < 0. \end{cases}$$

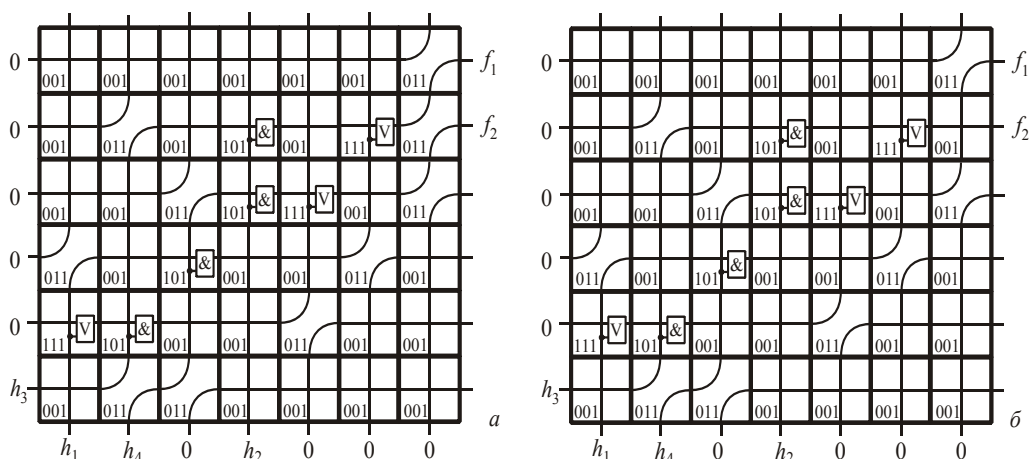


Рис. 3.16. Однородная вычислительная среда на базе  $M$ -автомата (с кодами настройки каждого автомата)

Для удобства дальнейших выводов величину  $\Psi$  можно представить в виде

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } s > 0, x_1 > 0, \\ \beta & \text{при } s < 0. \end{cases} \quad (3.26)$$

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

$$x_1(\Psi, t) = x_1(\Psi, 0) + \frac{-a_1 \Psi t - \exp(-a_2 t)x_2(\Psi, 0) + x_2(\Psi, 0)}{a_2} + \frac{(-\exp(-a_2 t)\Psi + \Psi)a_1}{a_2^2}; \quad (3.27)$$

$$x_2(\Psi, t) = \exp(-a_2 t)x_2(\Psi, 0) + \frac{(\exp(-a_2 t)\Psi - \Psi)a_1}{a_2}. \quad (3.28)$$

Используя полученные решения (3.27) и (3.28), можно построить фазовые портреты в фиксированных структурах рассматриваемого класса систем при  $\Psi = \beta, \beta < 0$  (рис. 3.17, а) и  $\Psi = \alpha, \alpha > 0$  (рис. 3.17, б).

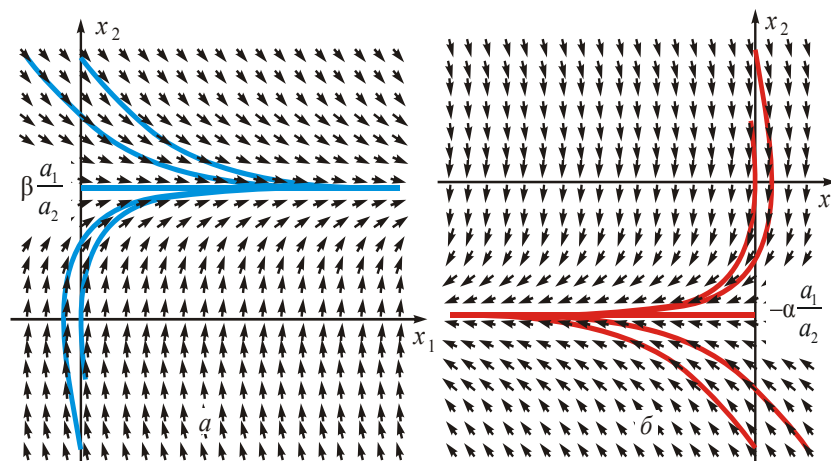


Рис. 3.17. Фазовый портрет в фиксированных структурах

Пусть значение постоянной времени в выражении (5.11)  $T = 97.7$  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  $t_{пер} = 7$  с в системе начался скользящий режим.

При начальных условиях  $(x_1 = 1, x_2 = 0, \Psi = \alpha)$  выбираем такое  $\alpha$ , чтобы система за промежуток времени 7 с попала на гиперплоскость  $S$ ,



расположенную под углом  $\text{tg}(c)$  к оси абсцисс. Для этого строим зависимость  $c(\Psi, t)|_{\Psi=\alpha}$ ,  $t \in [0..7]$  (рис. 3.18), откуда определяем, что при  $c = 0.7$  и  $t_{\text{пер}} = 7 \alpha = 2.91$ .

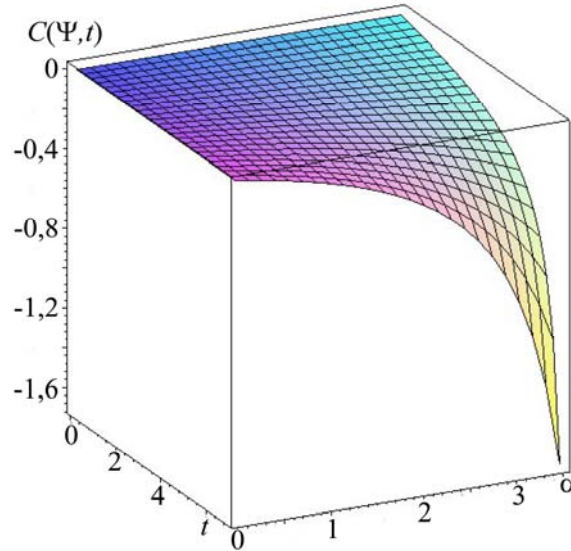


Рис. 3.18. График зависимости  $c(\Psi, t)$

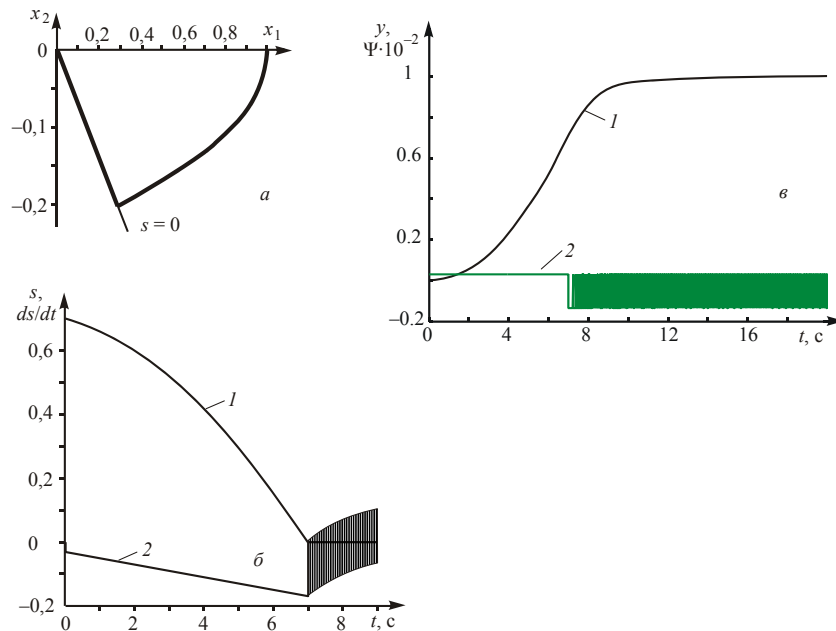


Рис. 3.19. Результаты моделирования работы системы:  
*а* – фазовая траектория; *б* – динамические характеристики (кр. 1 –  $s$ , кр. 2 –  $ds/dt$ ); *в* – динамические характеристики (кр. 1 – переходный процесс, кр. 2 – значения разрывного коэффициента)

Из формулы (3.28) 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  $\beta$ :

$$\beta < \frac{(c - a_2)x_2(\Psi, 0)|_{\Psi=\beta}}{a_1},$$

т. е.  $\beta < -13.55$ .

Из полученного неравенства выбираем значение  $\beta = -13.6$ .

Для того чтобы в рассматриваемой системе возник скользящий режим в момент времени  $t_{пер} = 7$  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. 3.19.



Рис. 3.19. Структурно функциональная схема системы охраны

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.

### 3.3. Интегрированные информационные системы охраны 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, охрана периметра, видеонаблюдение, аудиоконтроль, пожарная безопасность и т. д. Все это может быть интегрировано в единую, общую систему охраны. Каждая подсистема будет кратко описана в этом подразделе [3.3–3.5].

### **3.3.1. Структурно-функциональная схема системы охраны**

Рассмотрим СО в общем виде. СО можно представить как замкнутую систему управления (см. рис. 3.19).

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).

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 напрямую подает команды 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 – оно 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. Она 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 пр.). В этом же ряду находятся и средства вандалозащищенности оборудования систем безопасности (специальное крепление, антитамперные датчики и пр.), так как для их нейтрализации злоумышленникам также требуется время. В зависимости от размера, типа и других особенностей охраняемой зоны сами системы получили различные конструктивные особенности.

### **3.3.2. 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 которые можно отнести к СКУД для жилых помещений. Они 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 устанавливают 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, по 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 иммобилайзер 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 охранных датчиков является видеочамеры, которая формирует видеосигнал. Далее видеосигнал поступает на видеорегистратор, компьютер с системой видеоохраны, монитор пункта охраны (анализирующее и решающее устройство). При угрозе безопасности система или оператор подают команду на исполнительное устройство.

### **3.3.3. Датчики систем охраны.**

#### ***Датчики движения.***

Для охраны внутренних помещений наибольшее распространение получили пассивные ИК-датчики движения (рис. 3.20) и совмещенные датчики типа пассивный + микроволновой (рис. 3.21). Совмещенные датчики отличает гораздо более высокая надежность и устойчивость к ложным срабатываниям.

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 накладки, которые перекрывают часть чувствительного элемента датчика.



*Рис. 3.20. Внешний вид пассивного датчика движения*



*Рис. 3.21 Внешний вид дуального (комбинированного) датчика движения*

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 обеспечивается 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***



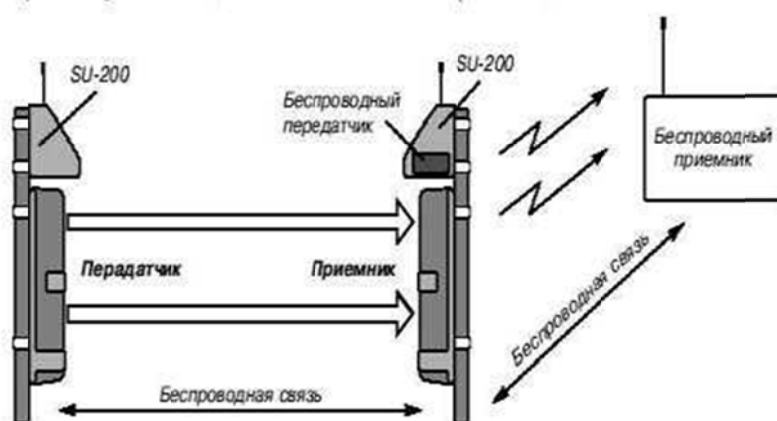
*Рис. 3.22. Датчик разбития стекла*

Датчики разбития стекла (рис. 3.22) 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, витрины и т. п., площадью до 10 м<sup>2</sup>. Двухпороговые датчики регистрируют звук удара по стеклу и звон разбиваемого стекла. Для индикации тревоги такой датчик должен зарегистрировать два соответствующих сигнала с интер-

валом не более 150 мс. Чувствительность датчиков разбития стекла регулируется с применением имитатора разбивания стекла

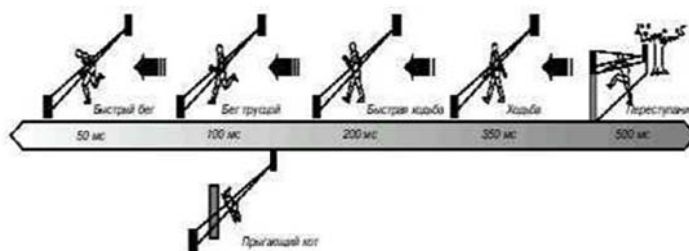
### **Фотоэлектрические датчики**

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. 3.23).



*Рис. 3.23. Фотоэлектрические датчики*

Датчики этого типа срабатывают при попытке пересечь систему лучей, отличаются высокой устойчивостью и надежностью работы. На рис. 3.24 показаны случаи пересечения барьера, которые различаются фотоэлектрическим датчиком. Наиболее совершенные модели фотоэлектрических датчиков могут работать автономно. Для этого они оснащаются солнечными элементами, которые заряжают аккумуляторные батареи датчиков.



*Рис. 3.24. 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 высокие цены, 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.

### ***Вибро-датчики***

Вибро-датчики 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 окнах 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 основа-

ния, 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.

### **3.3.4. Системы охранного телевидения.**

Система видеонаблюдения – одна из основных и самых эффективных способов обеспечения безопасности. Поэтому рассмотрим ее более подробно [3.3–3.5].

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 (так же 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-х), 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 выходе – 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, т. к. 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; автоматическая идентификация личности и т. д.

Однако до сих пор в роле решающего устройства и устройства памяти, как правило, используется сам человек. Техника только помогает ему принять решение. Органы зрения анализируют визуальную информацию опосредовано, 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, привносит 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 видеомонитор-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 поговорка: «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 видеомагнитофона, информация о внезапном пропадании видеосигнала или о каком-то движении в контролируемой зоне.

Современные интеллектуальные интегрированные системы охраны.

### **3.3.5. 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.

Таблица 3.1

*Сравнительные характеристики систем охраны*

№	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 выдыхаемого газа; общая вероятность корректного распознавания человека 0,999; преимущества: распознавание человека по интегральной оценке.	система анализа изображения человека, система анализа выдыхаемого газа человека, система анализа голоса человека, программное обеспечение.
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 «VideNet», позволяет добиться высокооточного конфигурирования и взаимодействия системы в целом и позволяет всем подсистемам работать в едином комплексе. Система охранной сигнализации дублируется приемоконтрольным прибором, что значительно повышает надежность системы в случаях проблем с электропитанием и проблемах 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.

Продолжение табл. 3.1

№	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
4.	Система идентификации личности по изображению «Face – интеллект», компания IVT, г. Москва	<p>«Face-Интеллект» автоматизированная система видеозахвата и идентификации личности по изображению лица человека. «Face-Интеллект» сканирует и «запоминает» лица всех людей, проходящих мимо видеокмеры, 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:</p> <p>Скорость обработки изображений Режим кодирования 0,26 сек</p> <p>Режим сравнения 913 000 изобр. в сек.</p> <p>Результатом работы системы является коэффициент схожести от 0 до 1</p> <p>Характеристики при пороге распознавания 0,58</p> <p>Вероятность ложной идентификации 1,4E-03 %</p> <p>Вероятность неидентификации в автоматическом режиме 22,6 %</p> <p>Вероятность неидентификации в экспертном режиме (база данных &gt; 2 500 000 изображений) 7,4 %</p> <p>Устойчивость идентификации</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• при поворотах головы</li> <li>• при наличие/отсутствии усов, бороды, очков, при изменении прически</li> <li>• при возрастных изменениях</li> <li>• при различных условиях съемки (яркость, контрастность, освещение, различный фон)</li> </ul> <p>Система Face-интеллект является модулем системы безопасности Интеллект, производимой той же компанией</p>	сервер, программный комплекс + дополнительное ПО (Модуль распознавания лиц Face – интеллект на систему, до 50 чел. в базе)

Продолжение табл. 3.1

№	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
5.	<p>Распределенная система видеонаблюдения и идентификации объектов «Лик», г. Томск</p>	<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 видеокамеры (в том числе аналоговые и цифровые камеры). Разработанная система коммутации позволяет одновременно обслуживать до восьми объектов, на один коммутатор.                      Технические характеристики</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• точность распознавания не менее 90 %;</li> <li>• время распознавания (независимо от объема базы) не более 0,2 сек.;</li> <li>• изменение прически, наличие бороды, усов и очков на точность распознавания не влияет;</li> <li>• допустимый поворот изображения 5 градусов;</li> <li>• количество каналов – 8.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• процессор (компьютер) идентификации, предназначенный для хранения и модификации базы данных эталонных изображений и распознавания;</li> <li>• система ввода и коммутации сигналов с видеодатчиков;</li> <li>• система формирования и коммутации управляющих воздействий на исполнительные механизмы;</li> <li>• сеть передачи данных;</li> <li>• линии связи между элементами системы;</li> <li>• программное обеспечение.</li> </ul>

Продолжение табл. 3.1

№	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
6.	Система для идентификации личности по голосу VIS	<p>VIS – программный пакет для автоматической текстонезависимой идентификации по голосу, основанный на одновременном усреднении параметров речи. Цели данной разработки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• использование компьютера для автоматической сегментации речевого сигнала и автоматического измерения параметров;</li> <li>• повышение надежности идентификации за счет комплексного анализа речевого сигнала;</li> <li>• уменьшение субъективности эксперта и времени проведения экспертизы за счет автоматической обработки информации.</li> </ul> <p>Эксперименты по идентификации, проведенные с собранной базой данных речевых сигналов, дали 92 % правильных решений.</p>	Программное обеспечение



Продолжение табл. 3.1

№	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
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. 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 правоохранительных 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). Особенности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Распределенная архитектура системы – сервера идентификации, АРМ оператора системы могут быть размещены на различных компьютерах, отдельно от основной системы VOCORD Phobos. Связь между серверами VOCORD VoiceID, VOCORD Phobos и АРМ оператора производится по протоколу TCP/IP (через локальную сеть или Интернет).</li> <li>• 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.</li> </ul>	<p>Система поставляется в виде аппаратной платформы, на которой установлена операционная система Windows XP и прикладное программное обеспечение, реализующее функциональность VOCORD VoiceID.</p>

№	Наименование, разработчик (изготовитель)	Выполняемые функции, технические характеристики, достоинства, недостатки	Комплектация
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Положение распознаваемого фрагмента записи может быть настроено пользователем. Это позволяет исключить из обработки нежелательные фрагменты (например, музыкальные вставки в начале или конце записи).</li> <li>• В Системе поддерживается многоуровневое разграничение прав доступа.</li> <li>• Аутентификация пользователей может производиться как в базе данных (SQL-идентификация), так и с использованием контроллера домена на базе Microsoft Active Directory (Windows-идентификация).</li> </ul>	
8.	Модуль лазерного капнографа, Россия, «Тритон-ЭлектроникС»	<p>Капнограф предприятия «Тритон-ЭлектроникС» для измерения концентрации CO<sub>2</sub> 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 калибровках. 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.</p>	Модуль лазерного капнографа
9.	Цифровой высокоточный алкометр AL 6000*[8]	<p>Алкотестер AL 6000 – алкометр последней модели. Алкометры предназначены для определения паров алкоголя в выдыхаемом воздухе.</p> <p>Алкотестер AL 6000 первый в мире алкометр, позволяющий проводить и контактное и бесконтактное тестирование. AL 6000 имеет компактный размер.</p>	Компактный алко-тестер, чехол, комплект сменных мундштуков

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 человека, 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 развитием 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 идентифицировать ее. Именно это позволяет принимать правильные решения.

Из таблицы 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 (напр., изменения характерных признаков лица). Указанный недостаток значительно уменьшает область применения таких охранных систем.

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 предлагаемой 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. 3.25 представлена структурная схема ИИСО.



Рис. 3.25. 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, и относящихся 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 и 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 и 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 позволит 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. 3.1.

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. Доработка и совершенствование программного обеспечения работающего с аппаратной частью ИИСО. Внесение 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, в не зависимости от того каким образом будут производиться попытки обхода системы.

## 3.4. ПО для информационных систем мехатроники

### 3.4.1. Введение

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 видео – датчиков, 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 роботом – манипулятором.

Машинное зрение – очень привлекательная для современных исследователей и разработчиков проблема, т. к. 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 видеоинформации 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, т. к. 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 изоциренных 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 транспортировка, 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 [3.1–3.5]:

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.

### **3.4.2. Общие сведения о программном обеспечении информационных систем**

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 известно также как «программирование обучением», является наиболее распространенным методом управления современными 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 повторного 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. Обобщенная схема работы программного обеспечения для системы технического зрения представлена в п. 3.1.

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 получение 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.

1. 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 [3.1, 3.9–3.20]:

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 локальной 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 видеoinформации, 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 ослабить или, наоборот,

рот, 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. 3.26, 3.27.

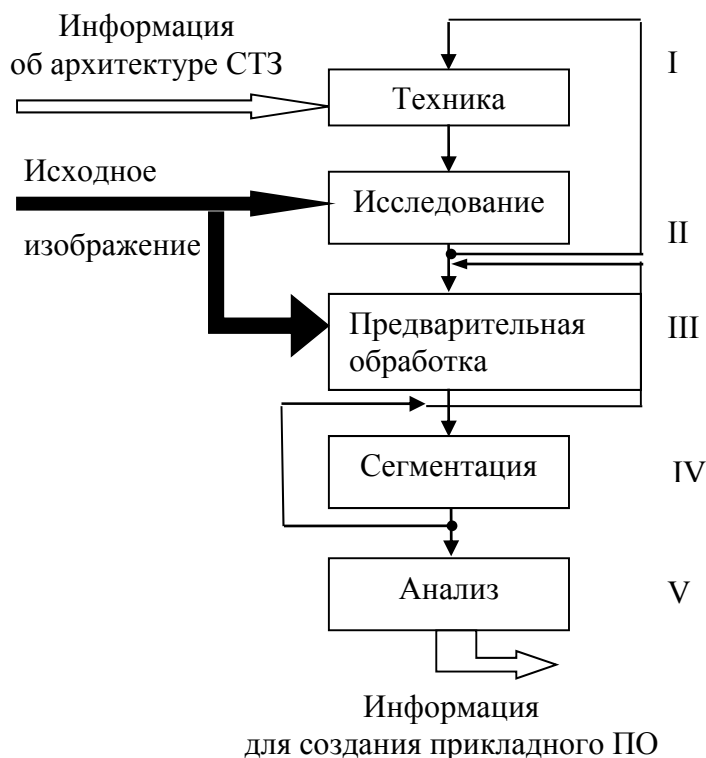


Рис. 3.26. Работа АСОИ с изображением объекта контроля (вариант а):

- 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 последовательное 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 1–4 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.

**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.

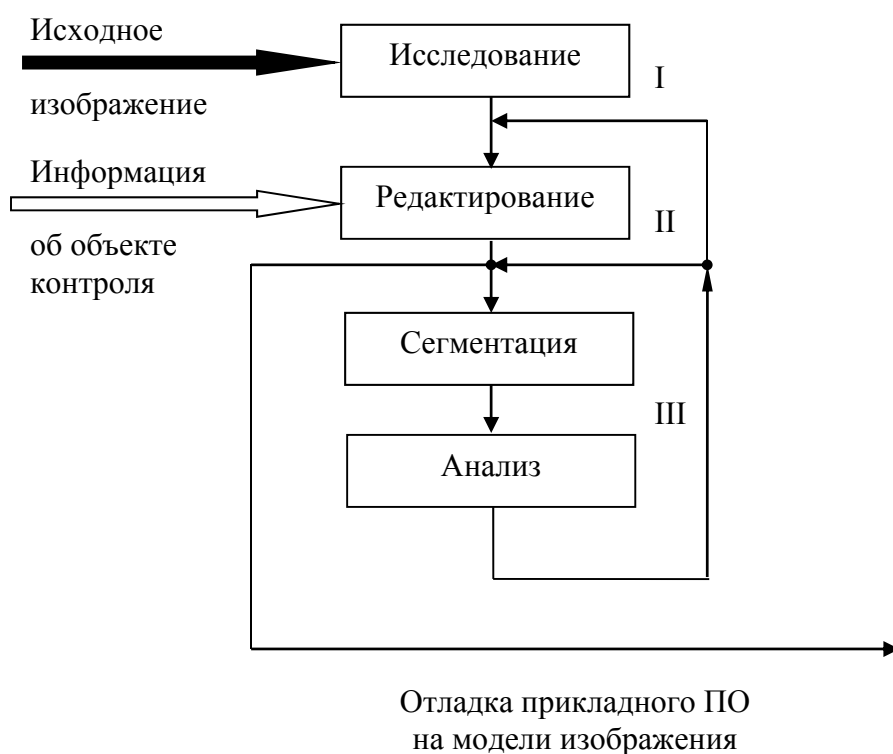


Рис. 3.27. Работа АСОИ с моделью объекта (вариант б):

- I* – выделение параметров имитации,
- II* – создание имитационной модели изображения по выбранным параметрам,
- III* – проверка работоспособности алгоритмов и информативности признаков

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, формируемым 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, имеющихся в фактографическом описании, на указанное устройство.

Библиографический список литературы, включенный в АБИПСИ, составлен по материалам иностранных и отечественных авторов по состоянию на начало 1989 г., преимущественно имеющихся в лабораториях и фондах библиотек страны, содержит более 10000 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 размерностью  $256 \times 256$  элементов и 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 бинаризировать и выделить контур изображения, определить форму и размер объектов, оценить качество синтезированной полупроводниковой пластины.

### 3.4.3. Языки программирования интеллектуальных систем

Важным моментом проектирования и эксплуатации СТЗ является правильный выбор языка моделирования и программирования зрительной системы. Языки, используемые в СТЗ, 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 [3.9–3.20].

Все началось в далеком 1959 году. 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 году – 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. Судите сами: 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 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 x86 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», то есть 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 годов вычислительные машины получили широкое распространение в университетах и научно-исследовательских институтах США и Западной Европы, и тогда же наступило время стремительного прогресса в области программирования. 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 году. 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.

#### *3.4.3.1. Интерпретаторы*

Одно, часто упоминаемое преимущество интерпретаторной реализации состоит в том, что она допускает «непосредственный режим». Непосредственный режим позволяет вам задавать компьютеру задачу вроде PRINT 3.14159\*3/2.1 и возвращает вам ответ, как только вы нажмете клавишу ENTER (это позволяет использовать компьютер стоимостью 3000 долларов в качестве калькулятора стоимостью 10 долларов). 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 компировании, 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 охоту к хорошему стилю программирования. Поскольку комментарии и другие формализуемые детали занимают значительное место программной памяти, люди стремятся ими не пользоваться. Дьявол менее ярок, чем программист, работающий на интерпретаторном Бейсике, пытающийся получить программу в 120К в памяти емкостью 60К. 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 много.

#### *3.4.3.2. Компиляторы*

Компилятор-это транслятор текста на машинный язык, который считывает исходный текст. 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 главных 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, расходуящие большую часть времени на возню с файлами на дисках или ожидание ввода, не смогут продемонстрировать какое-то впечатляющее увеличение скорости.



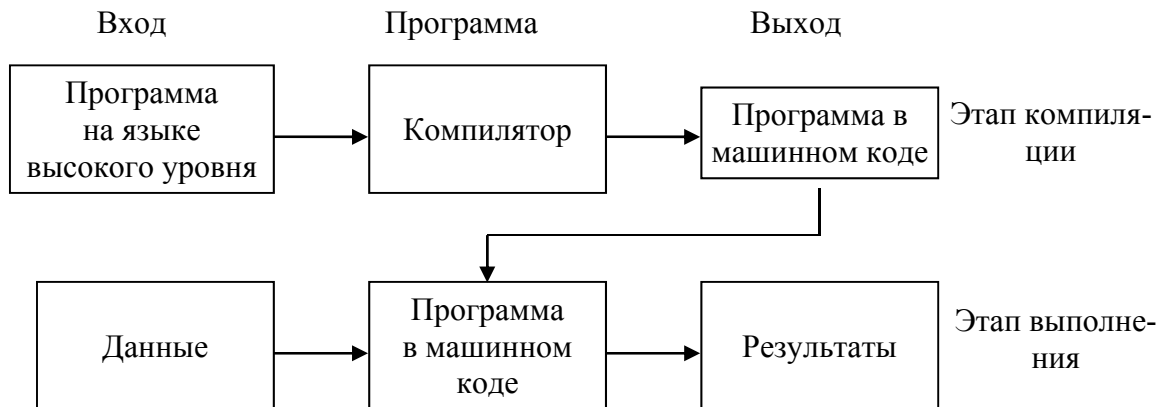


Рис. 3.28. Работа программы-компилятора

### 3.4.3.3. 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, IBM/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 слож-

ные команды, приближающиеся по своим функциональным действиям к операторам алгоритмических языков программирования.

- **Языки Символического Кодирования**

Продолжим рассказ о командных языках, **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 указанных 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 полная информация об языке **Ассемблера** 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**.

Т. о., 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, 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, разрядами, 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**, **Коболла**. Однако он допускает не только динамическое, но и управляемое и статистическое распределения 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 выполнение задач, которые составлялись на любых ранее неразработанных (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 вариан-

тами операторов языка **Фортран**. Поэтому этот язык позволяет решать достаточно широкий круг задач.

## **6. Непроцедурные языки**

**Непроцедурные языки** составляют группу языков, описывающих 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 все возможные 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 ком-

пактные программы. Во многих случаях программы, написанные на **Си**, сравнимы по скорости с программами, написанными на языке ассемблера. 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 свои существенные особенности, давайте перечислим некоторые из них:

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 огра-

ничения 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.

Также, как и особенностей, в языке **Си** присутствует куча недостатков. Ведь от них не защищен не 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, обеспечат 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-го. Более ранние версии языка использовались начиная с 1980-го 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-го. Однако тогда многие особенности **Си++** были еще не придуманы.

Название **Си++** выдумал 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 **Д** 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 друзьям 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, защи-

тить 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 **Си++** структуре, отразилось на возрастании масштаба программ, написанных со времени разработки **Си**. Маленькую программу (меньше 1000 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 разумным образом структурировать большие программы таким образом, чтобы для одного человека не было непомерным справляться 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 зависит 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 предавалось 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 программи-

рования, 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.

Большими преимуществами по сравнению с отмеченными имеют специализированные языки, разработанные для использования в СТЗ. Одним из примеров является язык Вал, разработанный для описания сборочных операций и управления роботами серии «Пума». Все команды языка Вал представляют собой фразы на английском языке. Вал включает полный набор операторов, предназначенных для обучения СТЗ (а также полностью робота) и редактирования программ. Управляющая система, включающая интерпретатор Вал, может управлять СТЗ, динамометрическими датчиками и другими подсистемами робота.

Из других языков высокого уровня прежде всего следует отметить язык Ада, разработанный в США для проектирования сложных (военных) систем. Ада – это современный, эффективный и переносимый язык, обеспечивающий программирование в реальном масштабе времени за счет механизмов распараллеливания и обработки исключений. В этом языке системное программирование поддерживается за счет доступа к системно зависимым параметрам и управления точностью в случае представления данных. Язык Ада может с успехом применяться для проектирования и программирования СТЗ.

Выбор языка определяется задачей, решаемой СТЗ, и ограничениями, накладываемыми аппаратной и алгоритмической реализациями. Основными требованиями, предъявляемыми к языку СТЗ, по нашему мнению, являются: 1) сложность написания и редактирования программ, 2) уровень развития (современность, эффективность и переносимость), 3) быстродействие, 4) объем занимаемой памяти, 5) возможность работы с регистрами нестандартных внешних устройств. В зависимости от вышеуказанных требований рассмотрим особенности использования в СТЗ таких наиболее применяемых языков, как Ассемблер, Си, Паскаль, Фортран, Квейсик.

По сложности написания программ эти языки можно расставить следующим образом: 1) Ассемблер, 2) Фортран, 3) Паскаль, 4) Си, 5) Квейсик, т. е. самые сложные программы получаются на Ассемблере, а самые простые – на Квейсике и Си.

По уровню развития языки программирования располагаются в следующем порядке: 1) Ассемблер, Си, 2) Фортран, 3) Паскаль, 4) Квейсик. Здесь следует отметить, что при имеющихся недостатках Ассемблера этот язык обладает большими возможностями, позволяющими описывать сложные (трехмерные и цветные) изображения и управлять СТЗ.

В зависимости от времени выполнения программ (быстродействия) языки можно расставить: 1) Ассемблер, 2) Квейсик, Си, 3) Фортран, Паскаль. По быстродействию вне конкуренции является Ассемблер. Далее следуют языки Квейсик и Си, хотя время выполнения некоторых операций фильтрации изображения у Квейсика выше, чем у Си в 1,5 раза.

По объему занимаемой памяти указанные языки располагаются следующим образом: 1) Ассемблер, 2) Си, 3) Фортран, Паскаль, 4) Квейсик. Следует отметить, что программы, написанные на языке Си, очень компактны и могут даже конкурировать по этому критерию с Ассемблером. Больше всех занимает память ЭВМ Квейсик, причем для откомпилированных программ, написанных на языке Квейсик, необходимо хранить язык в ОЗУ ЭВМ. Все указанные языки имеют возможность работы с регистрами нестандартных внешних устройств.

Приведенная выше ранжировка языков по перечисленным критериям является приближенной, однако она дает возможность ориентироваться разработчику в выборе языка проектирования и программирования СТЗ.

### **Контрольные вопросы к разделу 3**

- 3.1. Поясните назначение СТЗ, приведите структурную схему СТЗ промышленного робота.
- 3.2. Каковы основные классификации СТЗ, каковы особенности применения СТЗ?
- 3.3. Обоснуйте требования, предъявляемые к СТЗ.
- 3.4. Приведите обобщенный алгоритм обработки зрительной информации.
- 3.5. Изложите алгоритм формирования изображений.
- 3.6. Обоснуйте применение алгоритмов предварительной обработки изображений. Какие алгоритмы более быстродействующие?
- 3.7. Что представляет собой сегментация изображений?
- 3.8. Как происходит кодирование изображений? Как выделяются контуры изображений?
- 3.9. Приведите алгоритмы анализа черно-белых и цветных изображений.
- 3.10. Поясните алгоритмы анализа объемных изображений.
- 3.11. В чем суть корреляционного сравнения изображений?
- 3.12. Изложите применение структурно-перестраиваемых сред в процессе обработки информации.
- 3.13. Поясните цель и принципы действия интегрированных систем охраны.
- 3.14. Обоснуйте применение различных датчиков в системах охраны.
- 3.15. Какие языки программирования информационных систем вам известны?
- 3.16. Перечислите основные блоки программного обеспечения СТЗ.

### Список литературы к разделу 3

- 3.1. Системы технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др. // Под. общей редакцией В.И. Сырямкина, В.С. Титова. – Томск, 1992. – 367 с.
- 3.2. Мошкин В.И. и др. Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
- 3.3. Ю.М. Гедзберг. Охранное телевидение. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 312 с.
- 3.4. Малюк А. А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации: учеб. пособие – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 280 с.
- 3.5. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 368 с.
- 3.6. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск: Томский госуниверситет, 2006. – 288 с.
- 3.7. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. – Томск: Томский госуниверситет, 2007. – 192 с.
- 3.8. Глушков В.М., Капитанова Ю.В., Мищенко А.Т. Логическое проектирование дискретных устройств. – Киев: Наук. думка, 1987. – 264 с.
- 3.9. Давидов М.И., Антонов В.Г. LEX – генератор программ лексического анализа. – М., 1985.
- 3.10. Justin J. Crom BASIC Face-off // PC Tech Journal, September 1987, p. 136. – Перевод: Лопухов В.Н.
- 3.11. Керниган Б.В., Ритчи Д., Фьюэр А. Язык программирования Си. – Русский перевод: М.: Финансы и Статистика, 1985 г.;
- 3.12. Золотарев В.В. Основы автоматизации. – Ч. 1. – М., 1978
- 3.13. Ваулин А.С. Языки программирования – Кн. 5. – М., 1993 г.;
- 3.14. Терренс П. Языки программирования: разработка и реализация. – М, 1979.
- 3.15. Касвандс Э.Г. Введение в программирование на языке Ассемблер. – Ч. 1.
- 3.16. Хротко Г. Языки программирования высокого уровня. – 1982.
- 3.17. Малютин Э.А., Малютин Л.В. Языки программирования. – 1982.
- 3.18. Ушкова В. Новые языки программирования и тенденции их развития. – 1982.
- 3.19. Хьювенен Э., Сеппенен Й. Мир Лиспа. – Т. 1. – 1990.
- 3.20. Янг С. Алгоритмические языки реального времени. – 1985.

## 4. ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

### 4.1. Введение

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

### 4.2. 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 тeneвая, снижается, что повышает быстродействие 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 [4.1].

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 локализовано 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

$$C = \frac{L_a - L_b}{L_a + L_b},$$

где  $L_a, L_b$  определяется 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 светильных 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, например, 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.

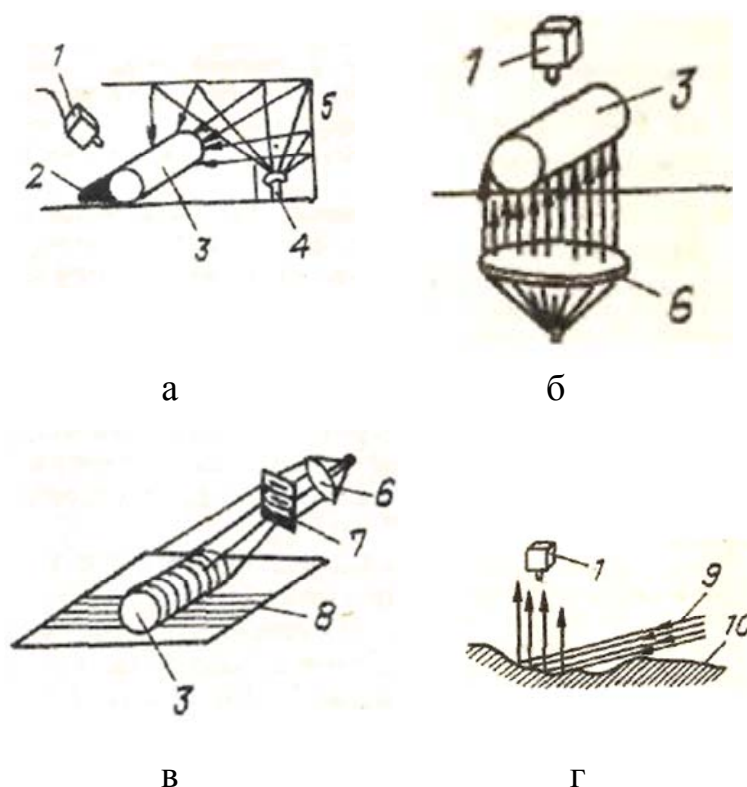


Рис. 4.1. Типовые схемы базовых осветительных систем

Известны четыре базовые схемы осветительных систем. Первая схема (диффузионное переднее освещение) используется (рис. 4.1) при работе с объектами, имеющими зафиксированные поверхности (рис. 4.1, а). Вторая схема осветительной системы (заднее освещение объекта коллимированным источником) применяется в случае, если силуэты объекта достаточно четки для его непосредственного анализа (рис. 4.1, б). Третья схема освещения представляет собой пространственно модулированный источник света (рис. 4.1, в). При данном методе ис-



пользуются специальные точки и линии на исследуемом объекте для получения его характеристик. Изгибы и неровности объекта искривляют направление световых лучей. По искривленным 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. 4.1, з). 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. 4.2.

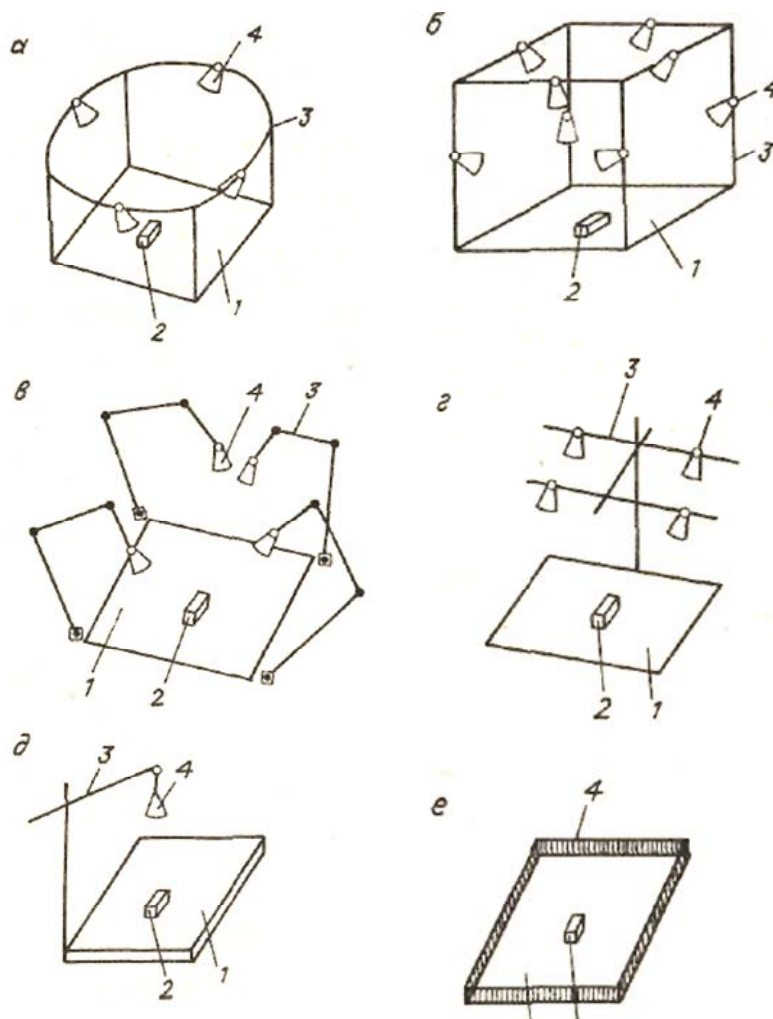


Рис. 4.2. Схемы размещения осветителей в рабочей зоне

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.

При расчете осветителей рабочей зоны возникают 1) оптические проблемы и 2) проблемы взаимодействия с внешней средой [3.3]. Первая определяет взаимосвязь источника и приемника оптического излучения. Освещенность рабочей сцены определяется при этом с помощью основного энергетического уравнения

$$\frac{\tau_c E_c}{L^2} (\rho_0 S_0 - \rho_{\Pi} S_{\Pi}) \geq m \frac{E_{\Pi}}{\tau_0},$$

где  $\tau_c, \tau_0$  – коэффициенты пропускания среды, объектива соответственно;  $E_c$  – освещенность сцены;  $\rho_0, \rho_{\Pi}$  – коэффициенты отражения объекта и помехи, соответственно;  $m$  – отношение сигнал-шум;  $E_{\Pi}$  – 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.

### 4.3. Оптико-электронные приемники излучения

Координатными (координатно-чувствительными, позиционно-чувствительными) приемниками излучения называются приемники, в которых выходной сигнал зависит от местоположения облученного участка светочувствительной поверхности [4.2]. 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 временную и температур-

ную 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 такого фотоприемника, 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 свето-

вого 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. 4.1. Хотя данные этой таблицы достаточно усредненные, они позволяют осуществить выбор типа МЭПИ для СТЗ роботов на стадии их проектирования.

Мозаичные преобразователи содержат мозаику оптико-электронных узлов, выполняющих функции регистрации и обработки видеосигналов. Один оптико-электронный узел мозаики может обрабатывать видеосигналы с одного (рис. 4.3, *а*) или нескольких (рис. 4.3, *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 аналоговые 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.

Таблица 4.1

*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	16×16	4×4	16×16
	... 64×64 (2...64)	... 128×144 (2...2048)	... 128×144 (2...256)	... 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

Принципы построения аналоговых мозаичных преобразователей рассмотрим на примере схемы линейки узлов выделения разностных видеосигналов (рис. 4.4). Каждый узел мозаики содержит фоторезистор  $R_i$ , нагрузочный регистор  $R1_i$ , 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  $R2_i C_i > T$ , то фотосигналы на выходных шинах  $X_i$

$$U_i \approx \frac{1}{R2_i C_i} \int_0^T R1_i [I_i(T) - I_{i+1}(t)] dt.$$

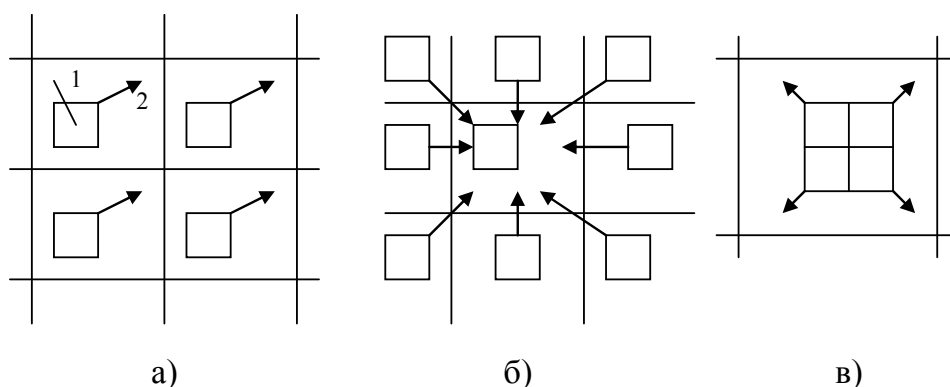


Рис. 4.3. Структурные схемы мозаичных преобразователей с обработкой сигналов с одного и нескольких приемников

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

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. 4.5, а). 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.

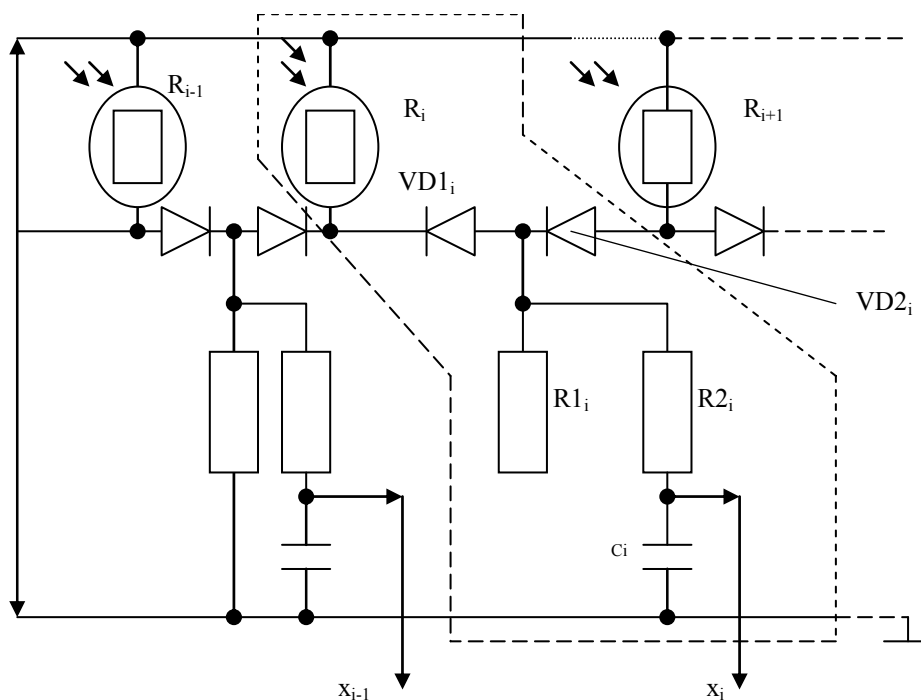


Рис. 4.4. Схема выделения разностных сигналов смежных элементов строки мозаики

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. 4.5, б, каждый узел содержит  $3 \times 3$  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.

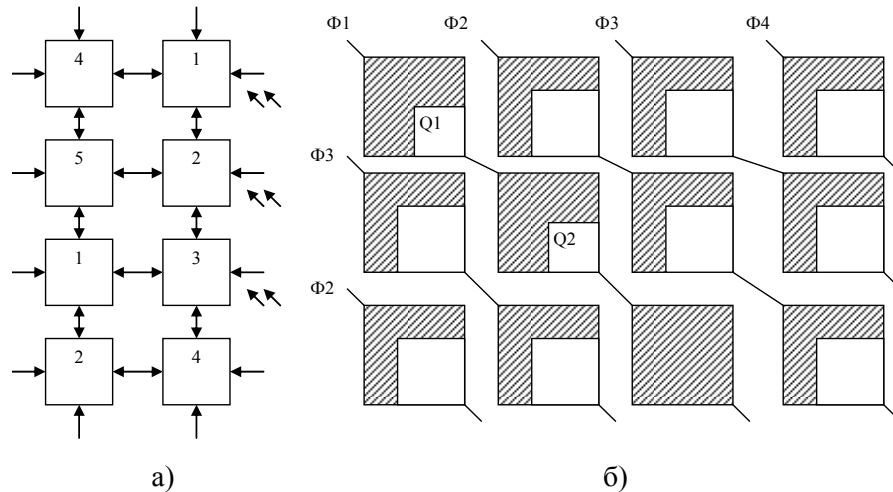


Рис. 4.5. Структурные схемы ПЗС-мозаик с ненаправленным и направленным переносом информации

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

$$U_c / U_{\text{ш}} = U_{cij} / (U'_{\text{ш}ij} + U''_{\text{ш}ij}),$$

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

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. Выполнения 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

$$U_c / U_{\text{ш}} = \sum_{ij} U_{cij} / \left( \sum_{ij} U'_{\text{ш}ij} + U''_{\text{ш}} \right).$$

Таким образом, путем потери разрешающей способности в  $\sqrt{n}$  раз удастся поднять отношение сигнал-шум в  $(U'_{\text{ш}} + U''_{\text{ш}}) / (\bar{U}'_{\text{ш}} + \bar{U}''_{\text{ш}} / n)$  раз (отметим, что  $\bar{U}'_{\text{ш}} \ll \langle U'_{\text{ш}} \rangle$ ).



Для структуры, показанной на рис. 4.5, 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. 4.6). 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. 4.7.

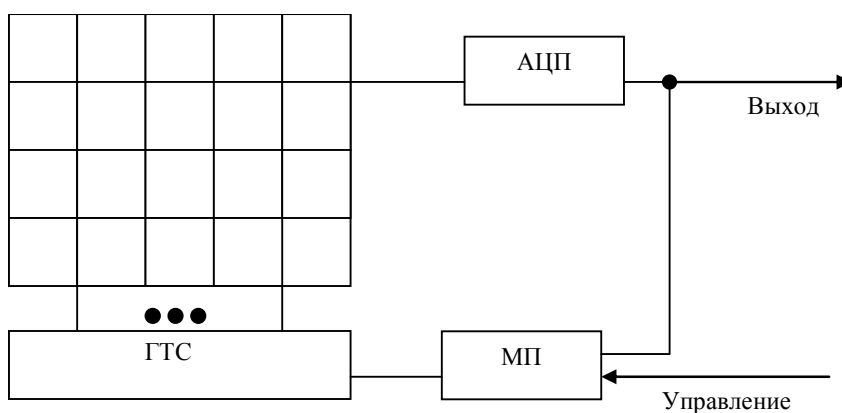


Рис. 4.6. Схема адаптивного фазирования управляющих сигналов ПЗС-мозаики с помощью микропроцессора: МП – микропроцессор; ГТС – генератор тактовых сигналов; АЦП – выходной аналого-цифровой преобразователь

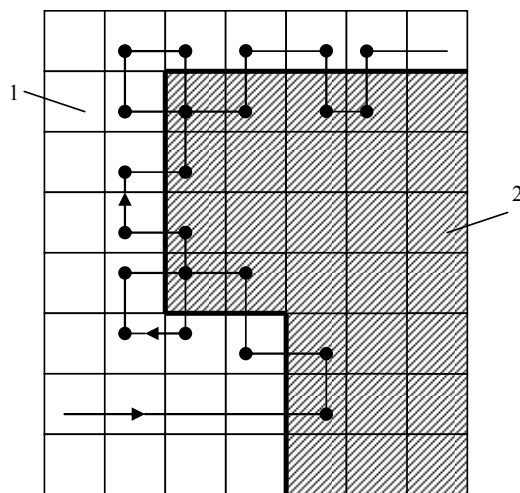


Рис. 4.7. Траектория пошагового сдвига зарядового пакета в мозаике в случае поиска контура зарядового рельефа: 1 – освещенная область; 2 – неосвещенная область

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. 4.8, а). В качестве компараторов можно использовать фототриггеры – запоминающие элементы с оптической записью информации, построенные на биполярных или МОП-транзисторах, фототиристорах (рис. 4.8, б).

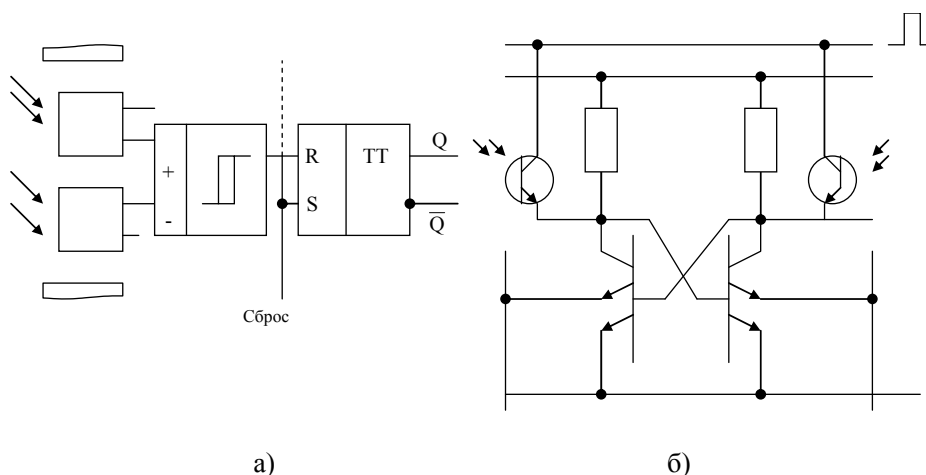
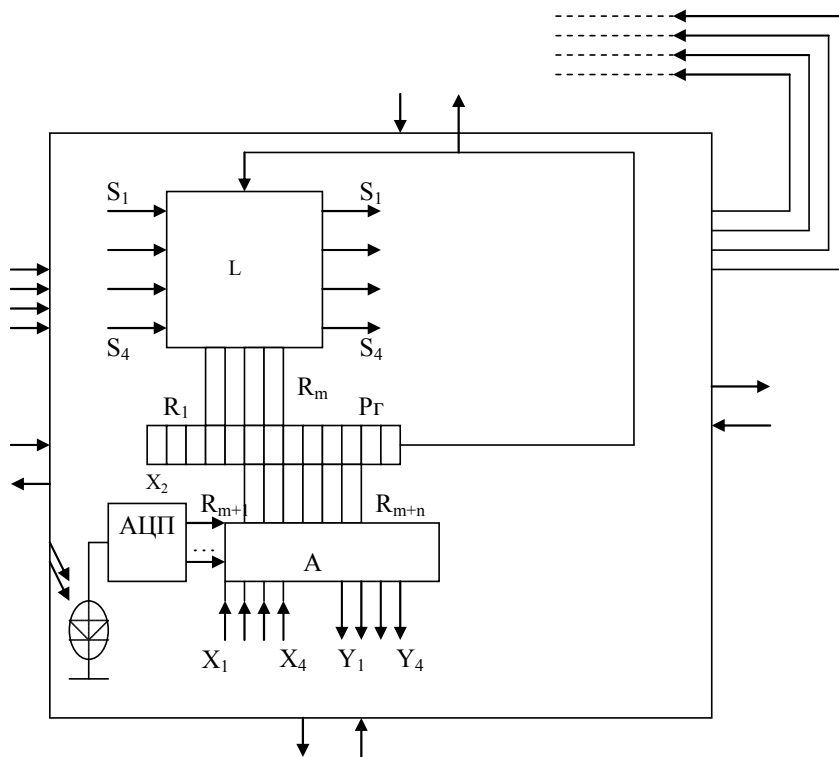


Рис. 4.8. Электрические схемы элементов мозаики, построенные на основе дифференциальных фотореле

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. Автомат с простой последовательной настройкой (рис. 4.9) 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  $R_1$ . 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  $\Phi$ ; в следующий момент времени сигналы настройки передаются на другие автоматы.



*Рис. 4.9. Электрическая схема элемента мозаики, выполненного на базе однородной вычислительной среды*

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.

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 суперортиконы и видиконы. Суперортиконы обладают высокой чувствительностью, но сложны по устройству и в эксплуатации, имеют сравнительно большие размеры. Для прикладных ТПК используют суперортиконы ЛИ201, ЛИ204, ЛИ213, ЛИ215, ЛИ216, ЛИ219, ЛИ221 – ЛИ224. Суперортиконы ЛИ207, ЛИ227 – ЛИ234 позволяют длительное время проецировать на фотокадод неподвижное изображение без эффекта «выжигания». Фотоэлектрические характеристики суперортиконов сильно зависят от температуры, поэтому при их эксплуатации в ряде случаев необходимо использовать специальные системы термостабилизации.

Видиконы имеют значительно меньшие размеры, чем суперортиконы, 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 матрицы 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. 4.2, где  $E_{\min}, E_{\max}$  – минимальные и максимальные значения рабочей освещенности;  $n - i$  разрешающая способность;  $I_c / I_{\text{ш}}$  – отношение сигнал-шум;  $\sigma_c$  – неравномерность сигнала по полю мишени;  $U'_c$  – послеизображение, определяемое значением сигнала, снимаемого с трубки после прекращения проецирования изображения;  $M$  – глубина модуляции (%) при разрешении 400 линий;  $\Gamma$  – геометрические искажения, %.

Таблица 4.2

Основные характеристики передающих телевизионных трубок

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

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, киносъёмочные и другие объективы.

Основные характеристики ряда объективов, нашедших наибольшее применение, приведены в табл. 4.3, где  $f'$  – фокусное расстояние;  $m$  – кратность изменения фокусного расстояния,  $m = m_{\max} / m_{\min}$ ;  $K$  – диафрагменное число;  $2\omega$  – угловое поле;  $n$  – разрешающая способность;  $\tau_0$  – коэффициент пропускания.

Фокусное расстояние объектива ТПК можно выбрать, используя номограмму, приведенную на рис. 4.10. 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.

Таблица 4.3

*Основные характеристики объективов ТПК*

Объектив	$f'$ , мм	$m$	$K$	$2\omega^\circ$	$n$ , линий/мм	$\tau_0$
<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	–	–

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. 4.11, *a*), имеет место неискаженное проецирование изображений стереопары на фоточувствительные мишени трубок. Однако

такая система не позволяет наблюдать за объектами, находящимися вблизи ТПК. Протяженность  $l_H$  недоступной для наблюдения зоны  $l_H = b/tg\omega$ , где  $b$  – расстояние между оптическими осями трубок. Кроме того, такая система характеризуется малым полем обзора. В двухтрубчатых системах с объективами, имеющими скрещенные оси (рис. 4.11, б), протяженность зоны, недоступной для наблюдения, меньше, а поле обзора больше. Однако этой схеме присущи трапецеидальные искажения формата кадра в вертикальном и горизонтальном направлениях [26].

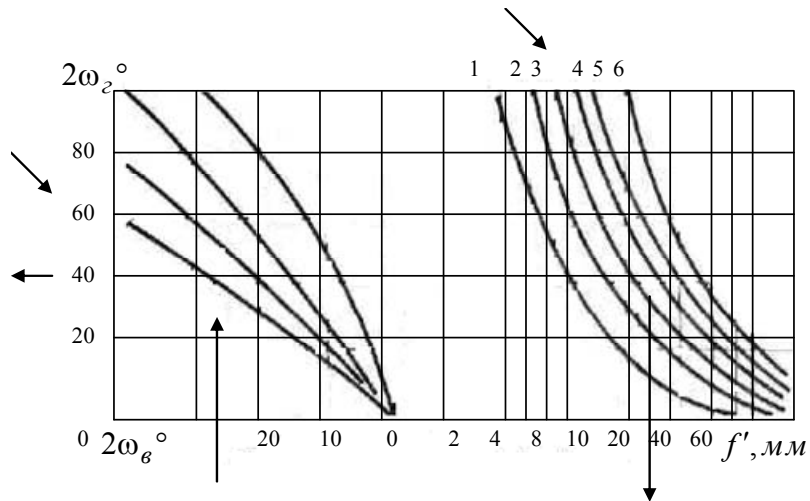


Рис. 4.10. Номограмма для выбора фокусного расстояния объектива ТПК:  
 1 –  $d = 7,5$  мм; 2 –  $d = 12$  мм; 3 –  $d = 16$  мм;  
 4 –  $d = 21$  мм; 5 –  $d = 25$  мм; 5 –  $d = 40$  мм

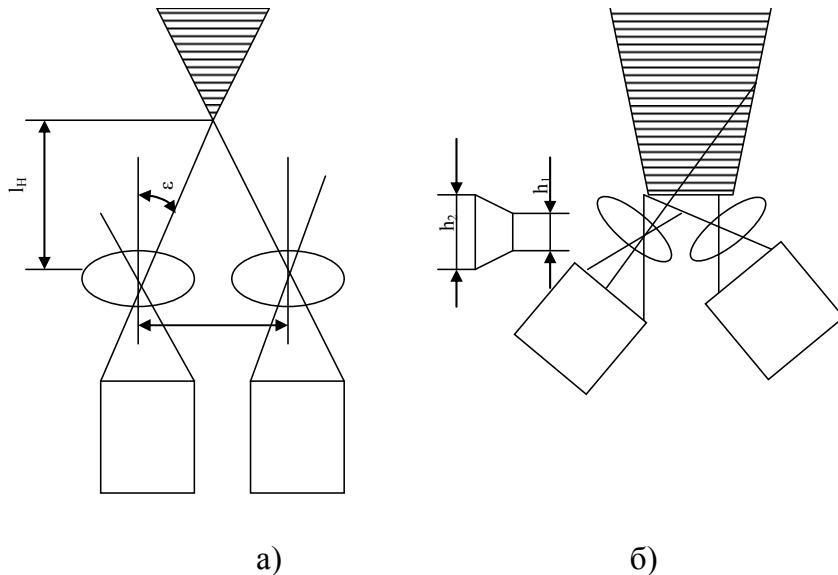


Рис. 4.11. Схемы построения стереоскопических ТИК с объективами, имеющими параллельные и скрещенные оптические оси:  
 $h_1$  и  $h_2$  – размеры сторон кадра при трапецеидальных искажениях

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

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  $N \times N$  пиксел. 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. 4.12. 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 основ-



ного 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.

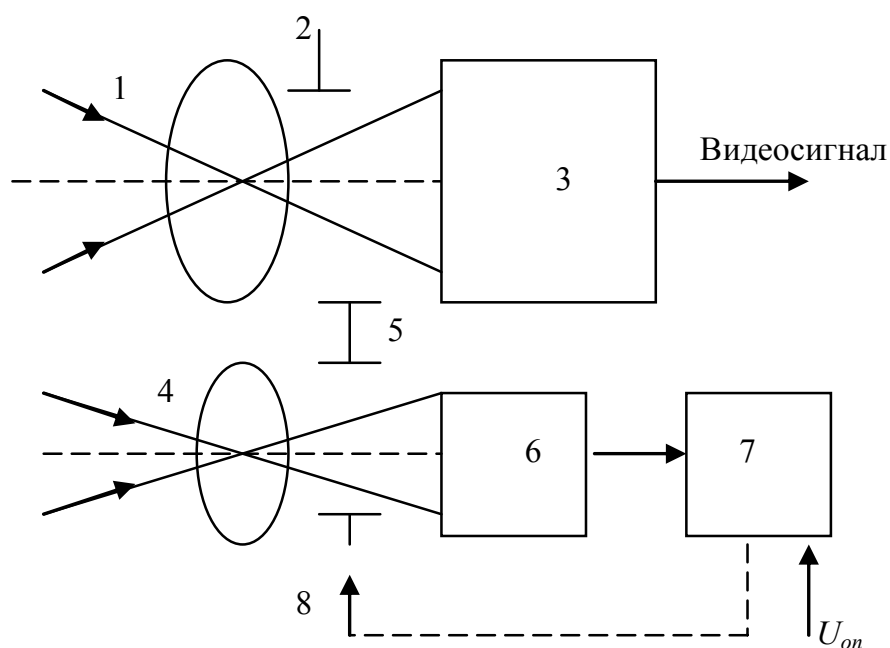


Рис. 4.12. Схема автоматической регулировки освещенности

Типовые параметры рассмотренных координатных аналоговых приемников излучения приведены в табл. 4.3.

Расширение функциональных возможностей видеосенсора в СТЗ роботов, получение информации о требуемой точностью и в необходимом объеме с минимумом аппаратных и программных затрат могут быть достигнуты в случае применения многоэлементных приемников излучения (МЭПИ), выполняемых на основе твердотельной или пленочной технологии. Эти фотоприемники характеризуются многими па-

раметрами 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.

Таблица 4.3

*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 о фоторезисторах: 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.

Более перспективны фотодиодные МЭПИ (ФД МЭПИ), имеющие высокое быстродействие и сравнительно высокую чувствительность. Такие приборы изготовляют 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. 4.13) в качестве ключевых элементов, развязывающих между собой фотодиоды, используют полевой транзистор (рис. 4.13, а) или диод (рис. 4.13, б). Для быстродействующих ФД МЭПИ ключевые развязывающие элементы выполняются на основе диодов с малыми емкостями, например в виде двухдиодной ключевой схемы.

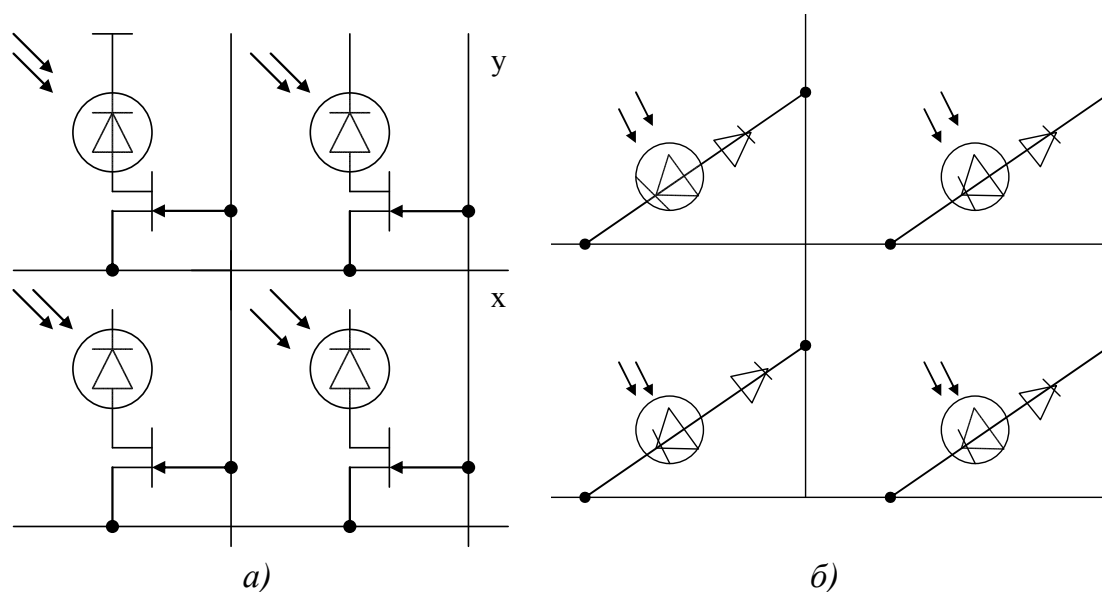


Рис. 4.13. Структура фотодиодных матриц с ключами:  
а – на полевых транзисторах; б – на диодах

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 освещен-

ности 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.

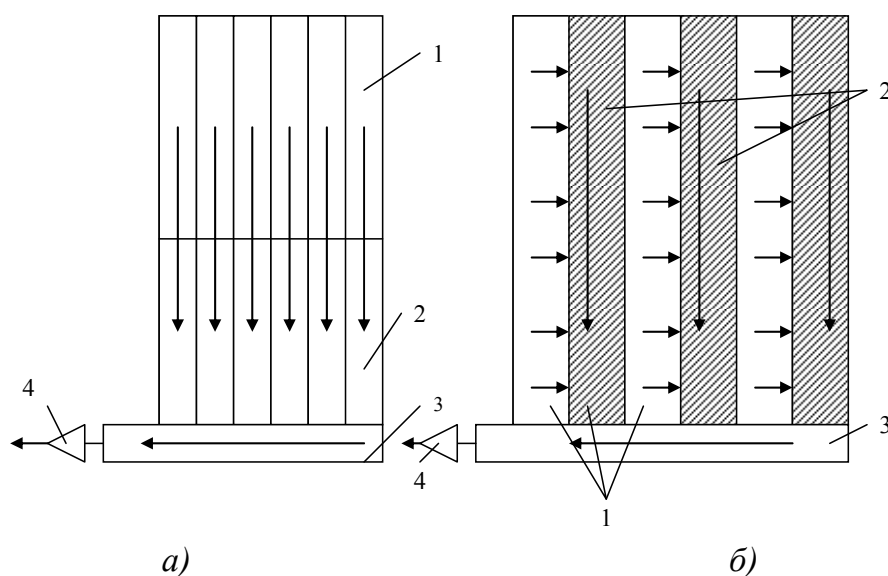


Рис. 4.14. Матрицы ПЗС с кадровым и со строчно-кадровым переносом заряда

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 со строчно-кадровым переносом заряда. В приборах с кадровым переносом (рис. 4.14, 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.

#### 4.4. Видеопроцессоры

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

Ниже приведены основные функции СТЗ и аппаратные средства их реализации [4.2].

Таблица 4.4.

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

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. 4.5.

Таблица 4.5.

*Основные способы первичного кодирования изображения*

Способ кодирования (изображение)	Условное представление	Способ реализации
Поэлементный бинарный: 101111 (бинарное)	$\begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$	Последовательное, параллельно-последовательное подключение к фотореле, к электронным релейным схемам
Поэлементный числовой: $a_{ij}, \dots$ (полутонное)	$a_{ij}$	Последовательное, параллельно-последовательное аналого-цифровое преобразование видеосигналов
С переменной длиной кода: $l_i, l_{i+1} \dots$ (контурное)	$l_i \quad l_{i+1} \quad l_{i+2}$	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

Хранение видеоинформации осуществляется в ЗУ трех основных типов. В последовательных ЗУ (рис. 4.15, а) видеоинформация вводится поэлементно последовательно во времени и так же считывается. В матричных ЗУ со словарной выборкой (рис. 4.15, б) запись и считывание информации осуществляется 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.

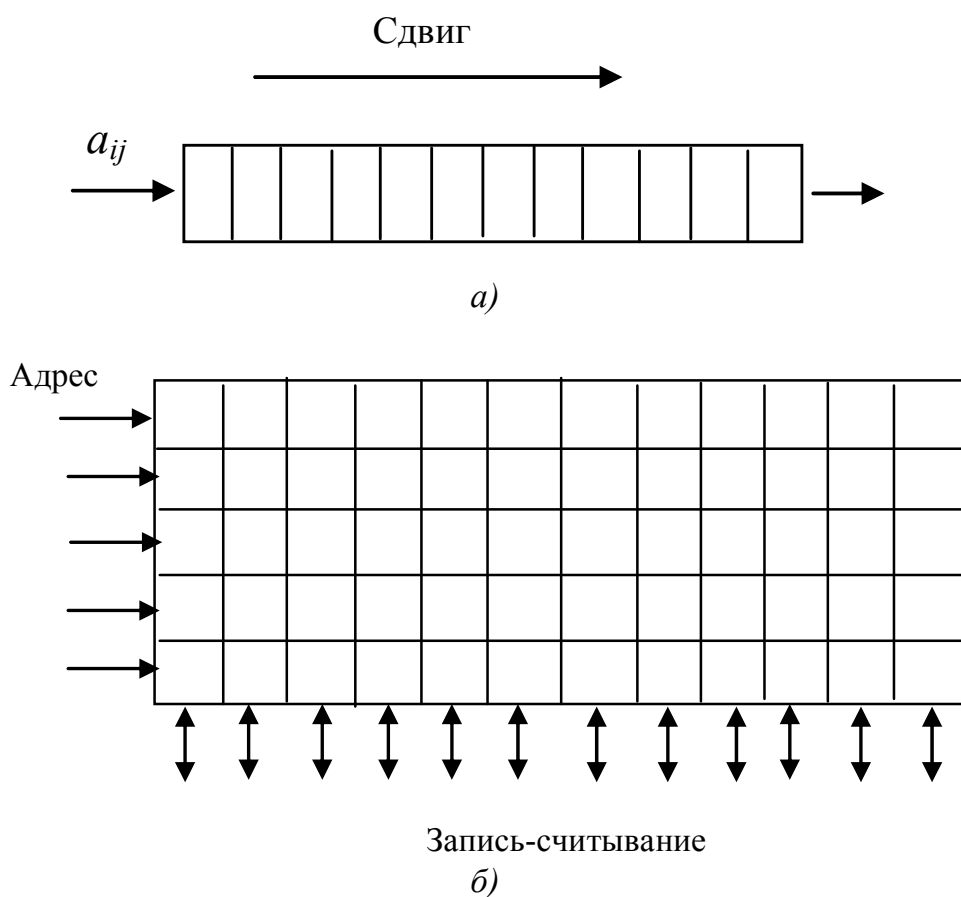


Рис. 4.15. Структуры ЗУ для хранения видеоинформации последовательного и матричного типа

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. 4.6.).

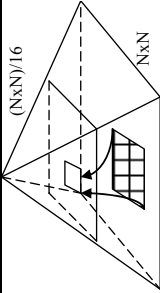
Таблица 4.6.

Основные виды обработки видеoinформации

Вид обработки	Условное представление	Типовые операции	Рекомендуемая структура видеопроцессора					
			матричная (клеточная)	пирамидальная (трехмерная)	конвейерная	системная (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	+	±	+		±	±



Окончание табл. 4.6

Вид обработки	Условное представление	Типовые операции	Рекомендуемая структура видеопроцессора					
			матричная (клеточная)	пирамидальная (треммерная)	конвейерная	системная (волновая)	параллельная	мультипроцессорная
Многоуровневые операции над данными с «пирамидальной» структурой		Быстрый «просмотр», сжатие-расширение, матричные операции	±	+	-	±	±	±
Операции высшего порядка над сложно закодированными или абстрагированными данными	-	Классификация, распознавание, интерпретация	-	-	-	-	+	+

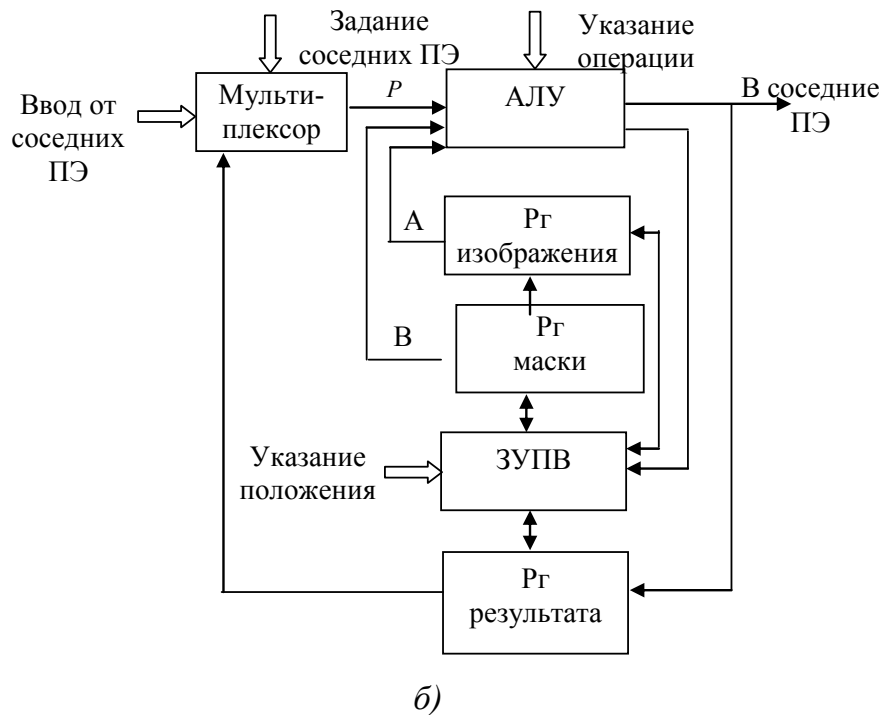
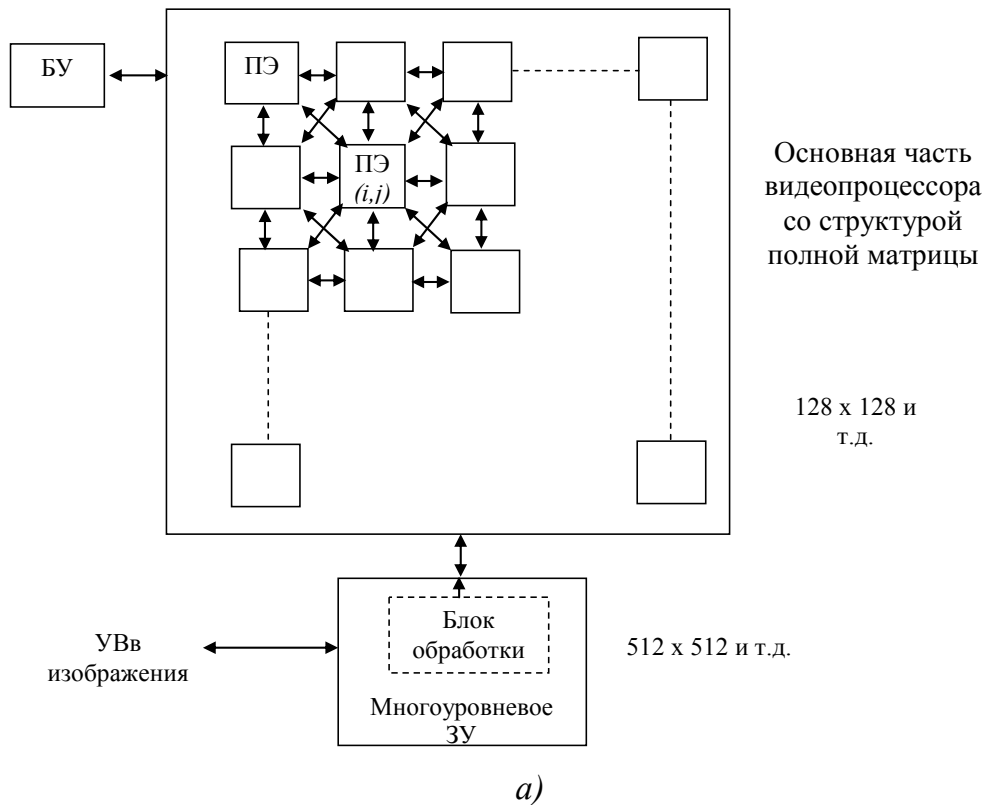


Рис. 4.16. Структуры матричного (клеточного) видеопроцессора и одного процессорного элемента:  
 БУ – блок управления; ПЭ – процессорный элемент; УВв – устройство ввода;  
 АЛУ – арифметико-логическое устройство; Рг – регистр;  
 ЗУПВ – запоминающее устройство о произвольной выборкой

Видеопроцессор матричной (клеточной) структуры содержит двумерный массив процессорных элементов ПЭ (рис. 4.16, *a*) размерностью  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$ , ...,  $256 \times 256$  в зависимости от используемой технической базы. Видеоинформация в матричном представлении разбивается на блоки в соответствии с размерностью массива процессорных элементов и обрабатывается поблочно (по принципу *SIMD* – один поток команд, множество потоков данных).

Типовая структура процессорного элемента матричного видеопроцессора приведена на рис. 4.16, *б*. Алгоритм работы видеопроцессора рассмотрим на примере выполнения операции увеличения (фрагмент бинарного изображения  $3 \times 3$  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

$$R \left\{ \begin{array}{l} (111111111), \text{ если поэлементная свертка} \\ \text{матриц } A \text{ и } B \text{ дает матрицу } B; \\ A, \text{ если поэлементная свертка матриц } A \text{ и } B \\ \text{не дает матрицу } B \end{array} \right.$$

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. 4.17.). 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 [17].

Пирамидальная структура видеопроцессора (рис. 4.18, *a*) содержит несколько «слоев» процессорных матриц с межслойными связями (рис. 4.18, *б*). Если все процессорные слои имеют одинаковое число процессорных элементов, то реализуется «трехмерная» структура видеопроцессора, принцип действия которого поясняет рис. 4.18, *в*. Свертка элементов  $x_{11}, \dots, x_{45}$  плоскости изображения с элементами маски, содержащей фрагмент единичных элементов с размерностью  $3 \times 2$ , позволяет выделить в плоскости результирующего изображения фрагмент из элементов  $x_{ij}$  с той же размерностью  $3 \times 2$ .

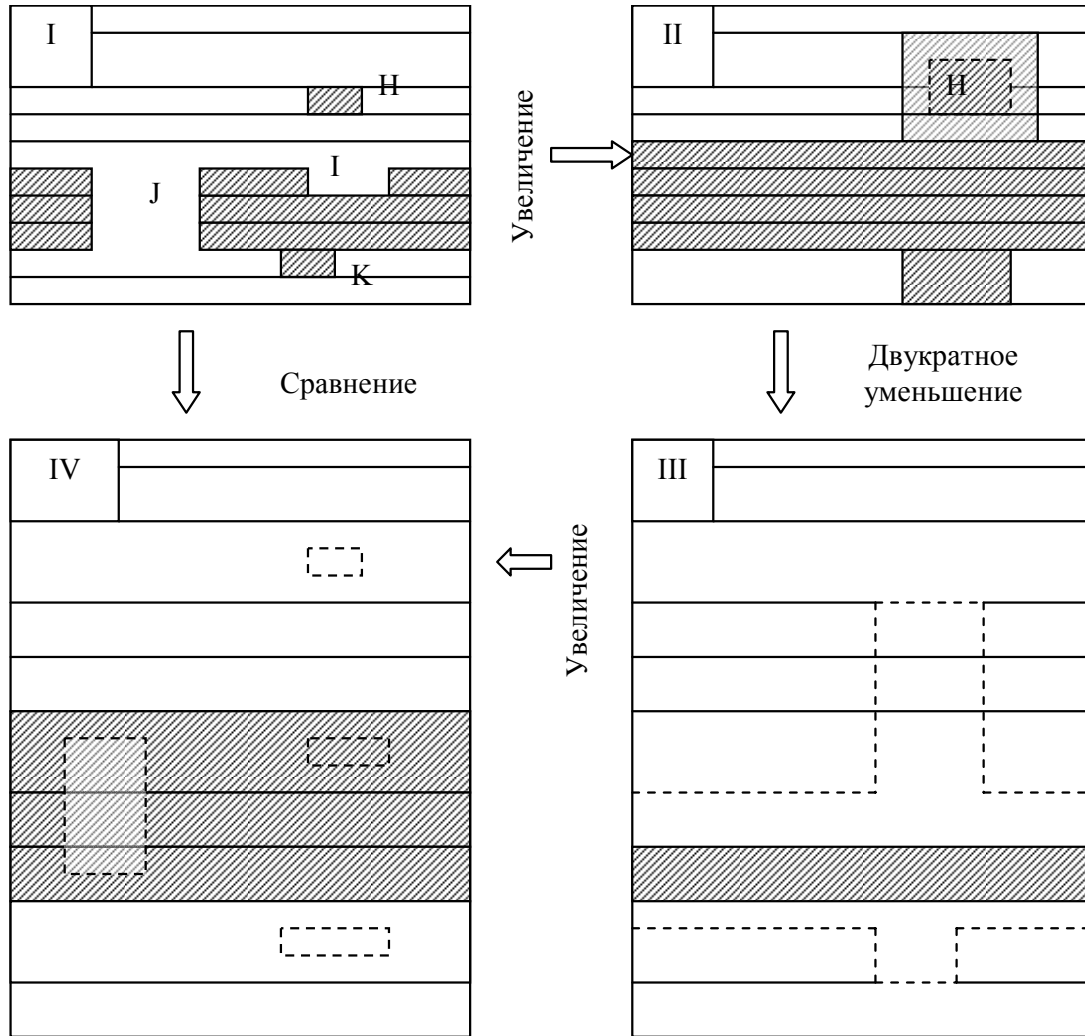


Рис. 4.17. Схема удаления «дефектов» и «шума»

В конвейерных видеопроцессорах (рис. 4.19) процессорные элементы составляют последовательный ряд, поэтому они являются оптимальными для обработки изображений, представляемых растровой (построчной) разверткой.

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

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

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.

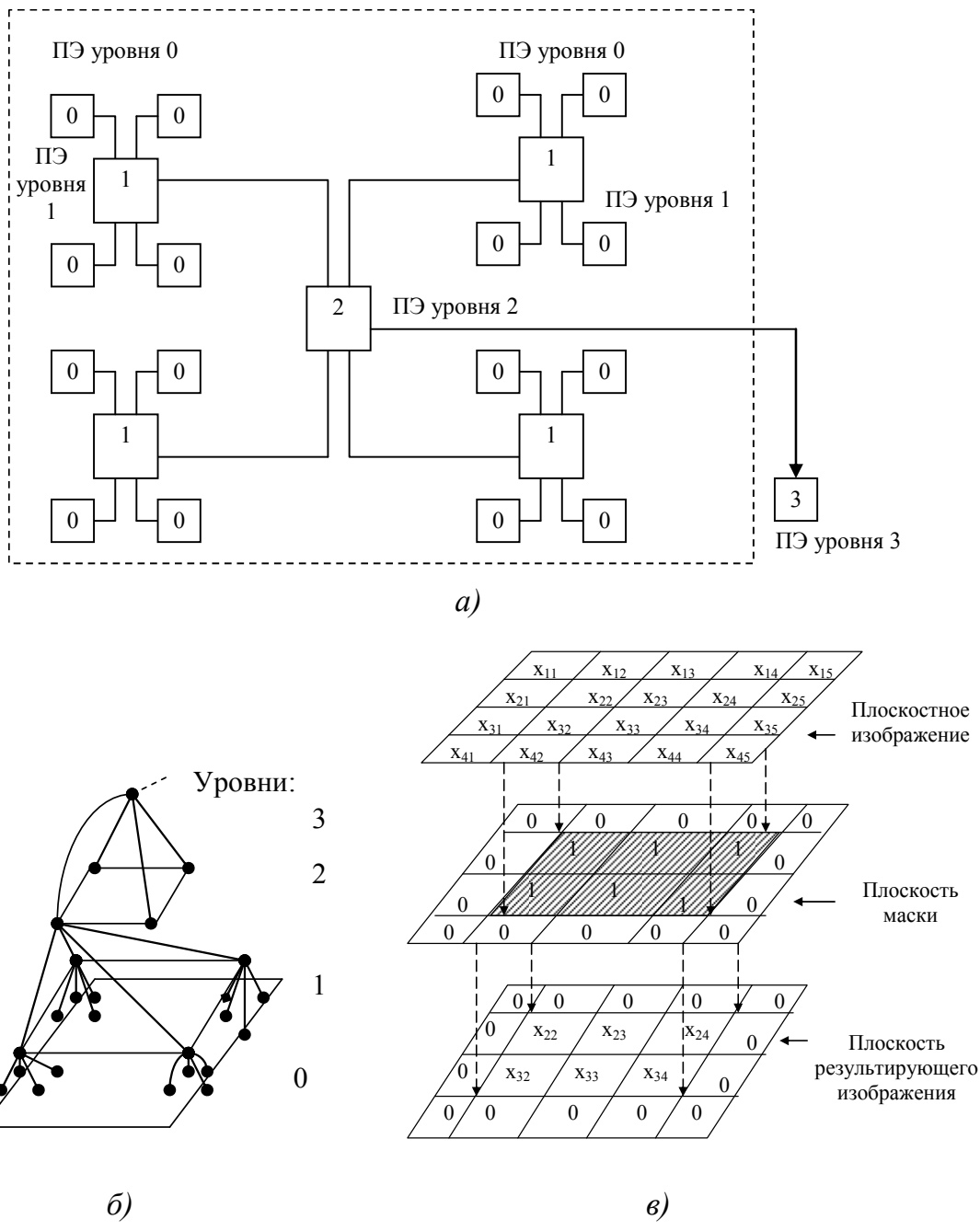


Рис. 4.18. Пирамидальная структура видеопроцессора и схема, поясняющая принцип выполнения простейших операций над изображениями в трехмерной процессорной структуре

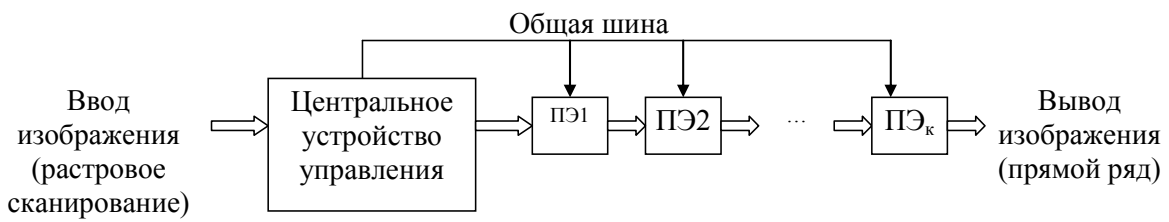


Рис. 4.19. Структура конвейерного видеопроцессора

Видеопроцессоры со систолической структурой содержат регулярную сеть процессорных элементов, каждый из которых работает циклически, чередуя прием и передачу видеоинформации, подобно элементам конвейерных видеопроцессоров. На рис. 4.20. приведена структура, реализующая, например, матричную операцию  $D = A \cdot B + C$  за число тактов, соответствующее размерности матриц.

Видеопроцессоры с параллельной (рис. 4.21, 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.

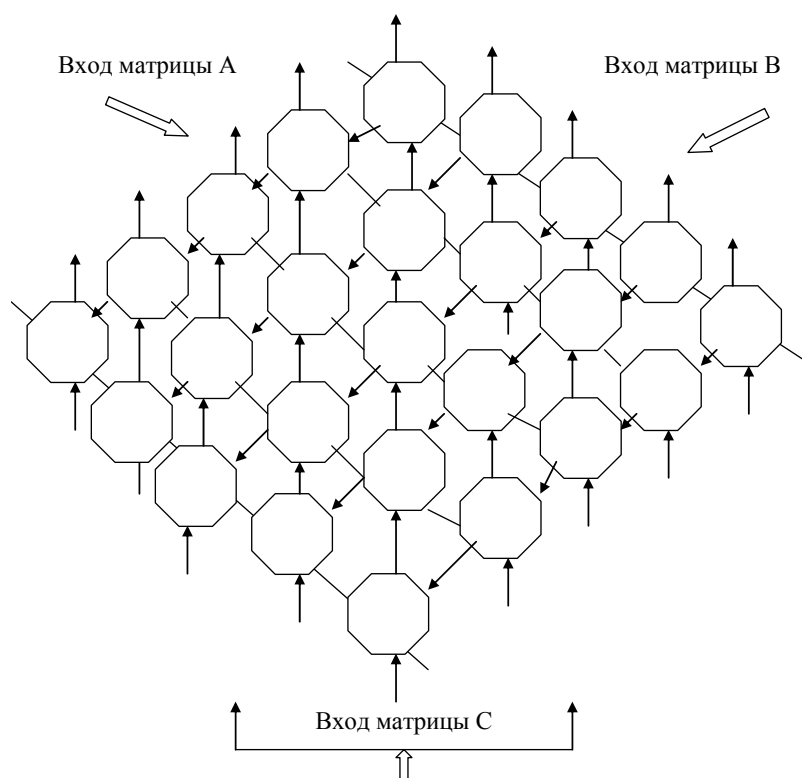
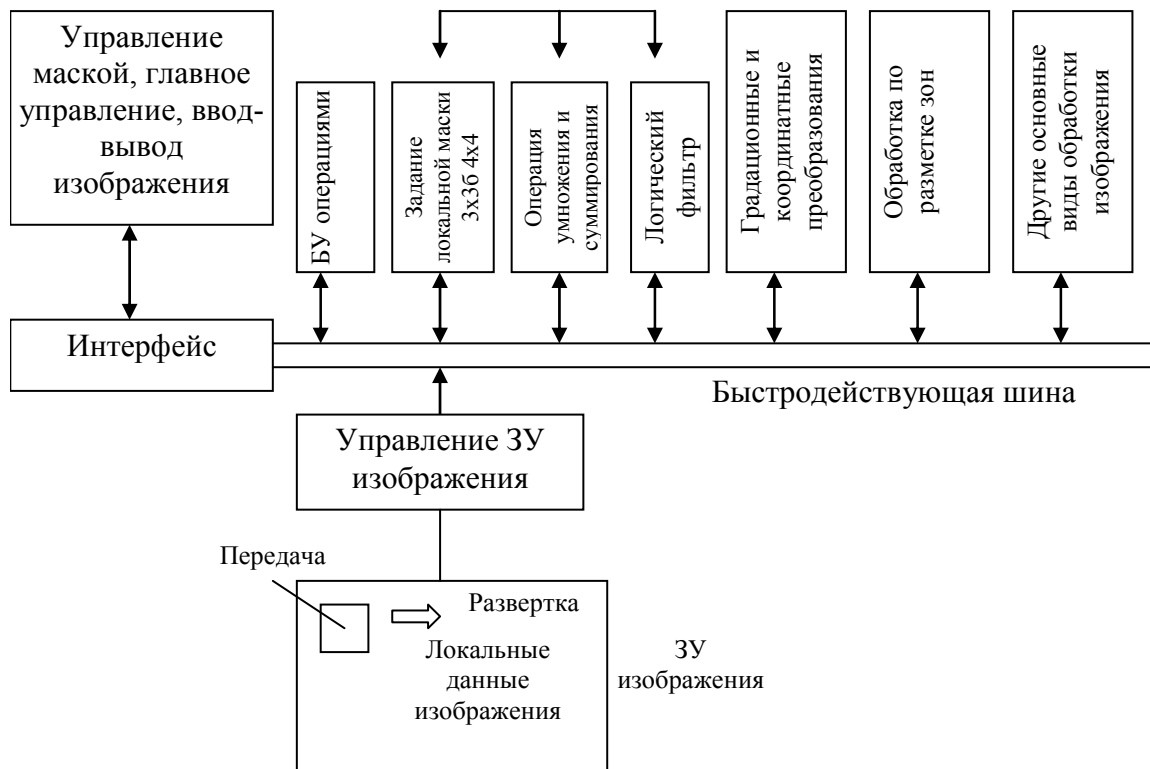
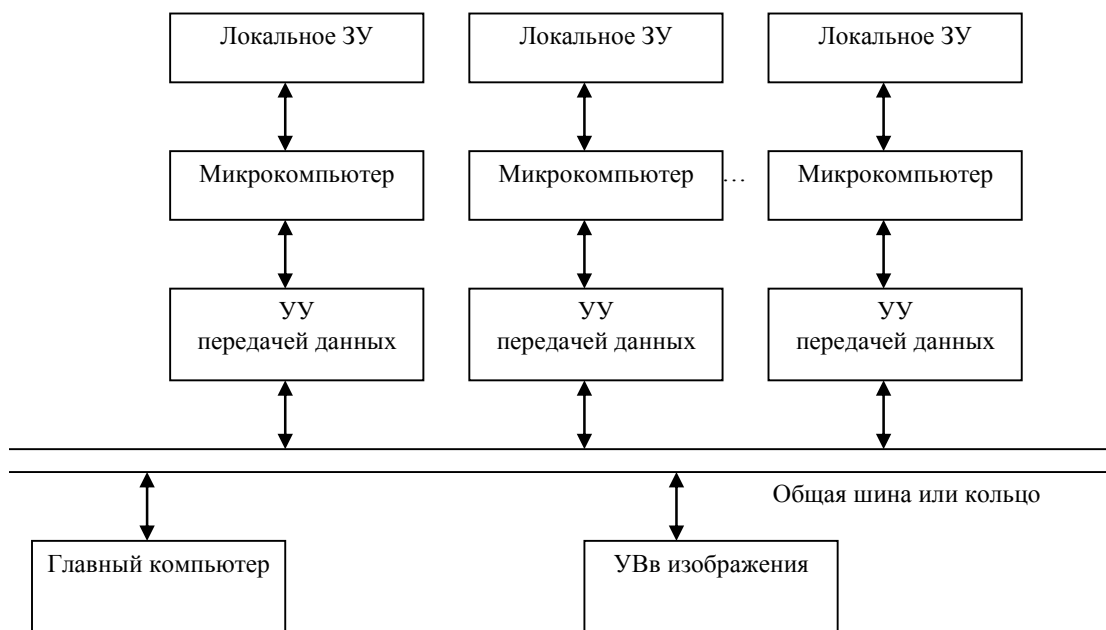


Рис. 4.20. Систолическая структура видеопроцессора

Видеопроцессоры с мультимикропроцессорной структурой (рис. 4.21, 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 per second*) – миллион пикселей (элементов изображения) в секунду.



а)



б)

Рис. 4.21. Видеопроцессоры с параллельной и мультимикропроцессорной структурами

## 4.5. Датчики оучувствления

Рассмотрим датчики оучувствления 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 оучувствления роботов в ближней и сверхближней зонах [4.3].

### 4.5.1. 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. 4.22. На рис. 4.22, 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. 4.22, б и в).

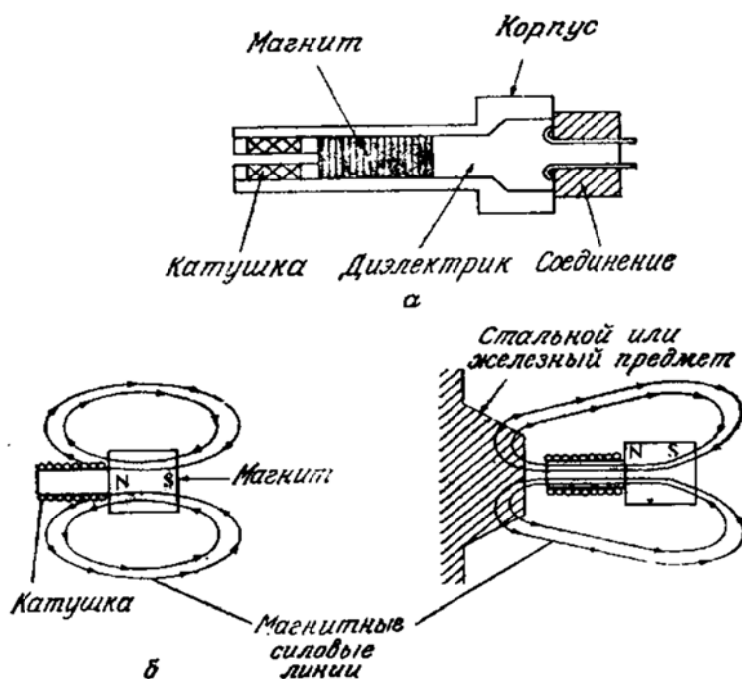


Рис. 4.22. Индуктивный датчик (а), форма магнитных линий при отсутствии ферромагнетика (б) и при наличии ферромагнетика в зоне измерения датчика(в)

При отсутствии движения силовые линии не изменяются и, следовательно, в катушке ток не индуцируется. Изменение напряжения на



выходе катушки обеспечивает эффективное очувствление в ближней зоне на расстояниях  $\sim 1$  мм (рис. 4.23).

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.

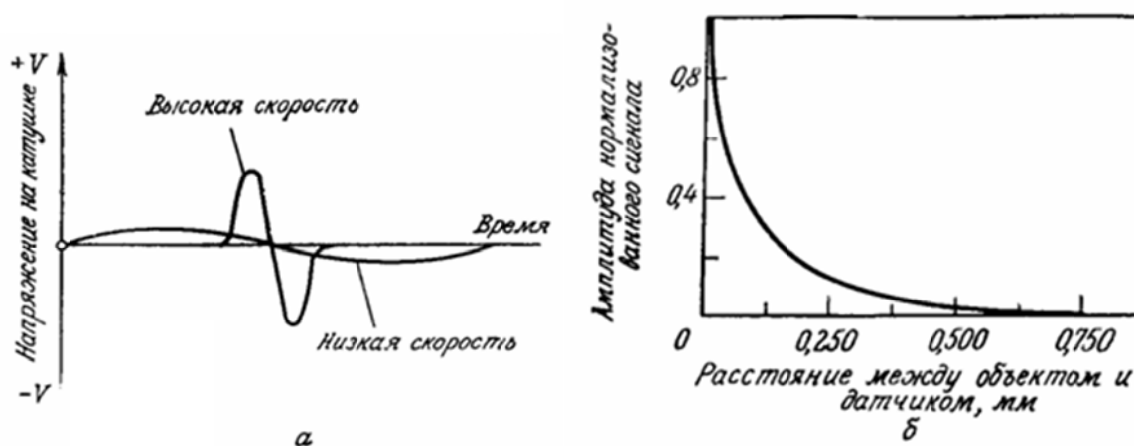


Рис. 4.23. Зависимость выходного сигнала индуктивного датчика от скорости

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.

#### 4.5.2. Датчики Холла

Эффект Холла связывает напряжение между двумя точками в проводнике или полупроводниковом материале в магнитном поле, воздействующим на этот материал. Используемые сами по себе датчики Холла могут уловить только намагниченные объекты. Однако, если их использовать вместе с постоянным магнитом (рис. 4.25), они способны установить наличие всех ферромагнитных материалов.

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. 4.26). 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. 4.26. 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.

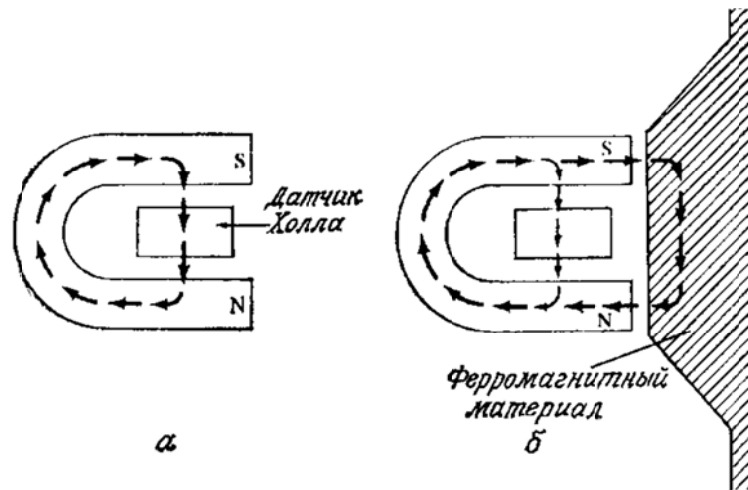


Рис. 4.25. Работа датчика Холла (а), снабженного постоянным магнитом (б)

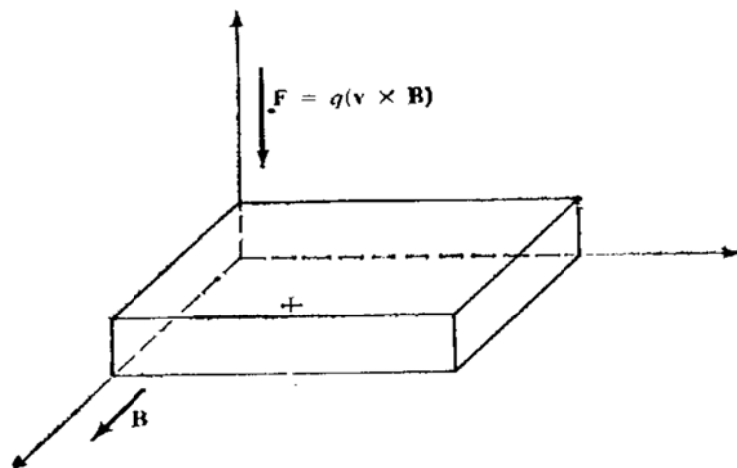


Рис. 4.26. Возникновение эффекта Холла

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 использо-

вания электронного усилителя и обработки сигналов непосредственно на датчике, уменьшая тем самым размеры и стоимость.

### 4.5.3. 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. 4.27).

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;
- емкостной 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.

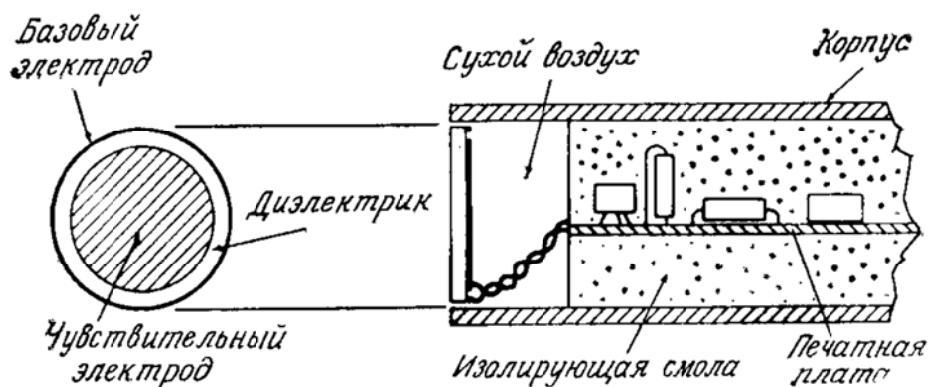


Рис. 4.27. Емкостной датчик измерения в ближней зоне

На рис. 4.28 показано изменение емкости в зависимости 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  $T$ .

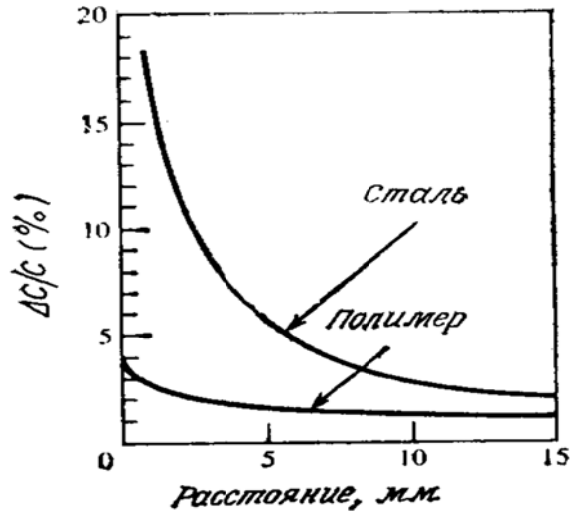


Рис. 4.28. Зависимость процентного изменения емкости датчика в ближней зоне от расстояния

#### 4.5.4. 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. 4.29).

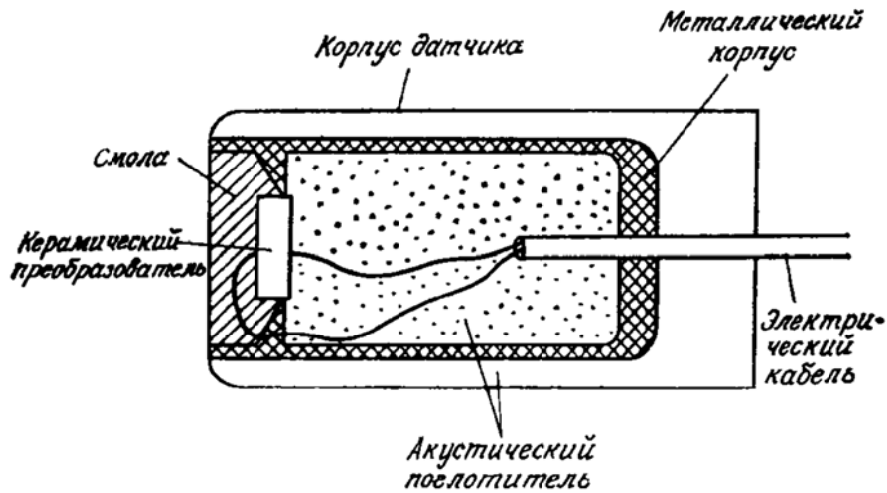


Рис. 4.29. Ультразвуковой датчик измерения в ближней зоне

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 для 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. 4.30).

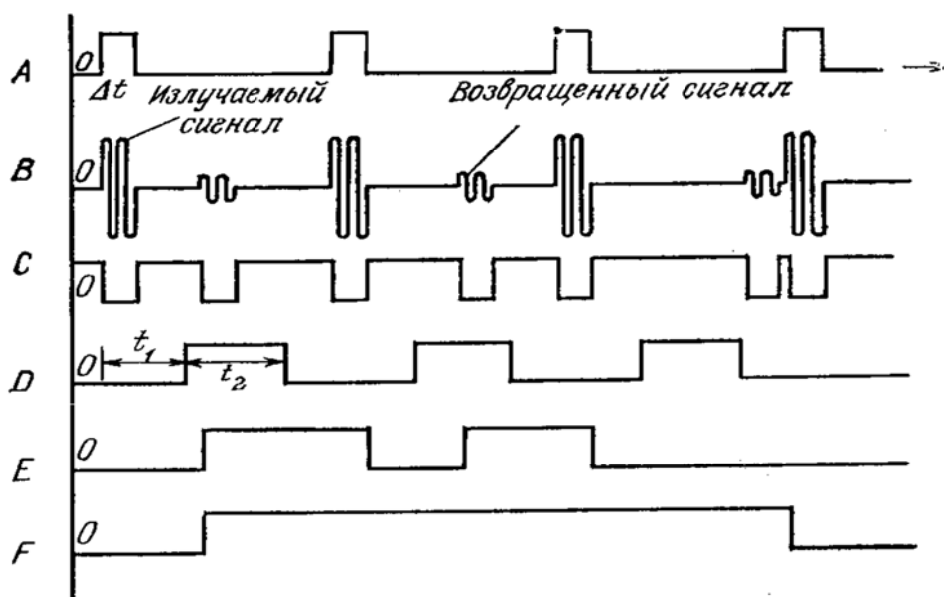


Рис. 4.30. Сигналы, используемые в ультразвуковом датчике измерения в ближней зоне

**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  $\Delta t$  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.

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.

#### 4.5.5. 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. 4.31.

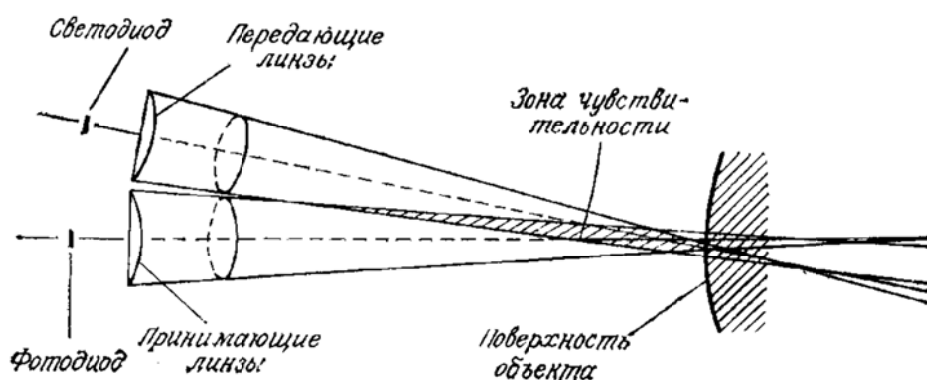


Рис. 4.31. Оптический датчик измерения в ближней зоне

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 конусообразной 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 (рис. 4.31) 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, приведенную на рис. 4.31, используют в режиме, при котором формируется дискретный выходной сигнал при достижении интенсивности отраженного светового потока определенного порогового значения.

#### 4.5.6. 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 выходной сигнал аналоговых датчиков пропорционален прикладываемому усилию.

#### 4.5.7. Дискретные пороговые датчики

Дискретные тактильные датчики являются контактными приборами типа микропереключателей. В простейшем случае переключатель размещен на внутренней поверхности каждого пальца манипулятора (рис. 4.32).

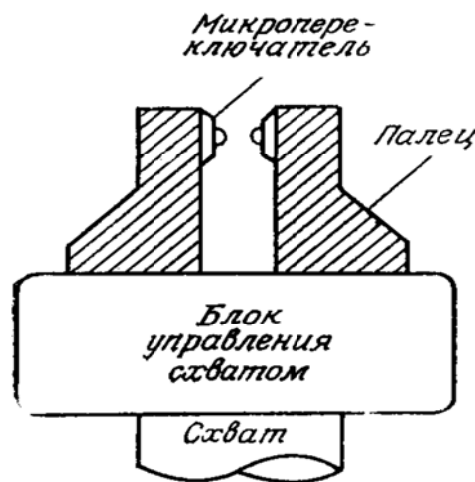


Рис. 4.32. Простой схват робота с бинарными тактильными датчиками

Этот вариант оцувствления 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.

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»).

#### 4.5.8. Аналоговые датчики

Аналоговый тактильный датчик является регистрирующим прибором, выходной сигнал которого пропорционален прикладываемой силе. Простейший из таких приборов состоит из подпружиненного стержня (рис. 4.33), который механически связан с вращающейся осью.

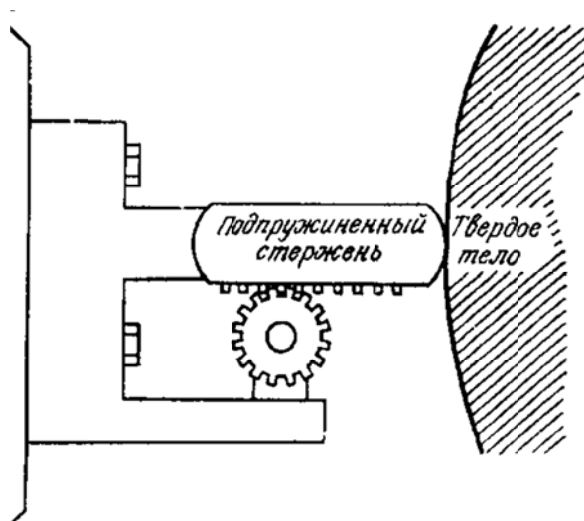


Рис. 4.33. Типичный аналоговый тактильный датчик

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 работа с объектом на схвате робота размещают матрицы тактильных датчиков, параметры которых меняются в зависимости от давления («графитовые столбики») (рис. 4.34).



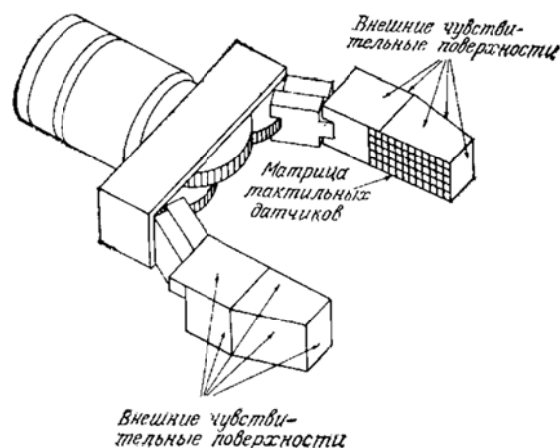


Рис. 4.34. Схват робота, оснащенный матрицами тактильных датчиков

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.

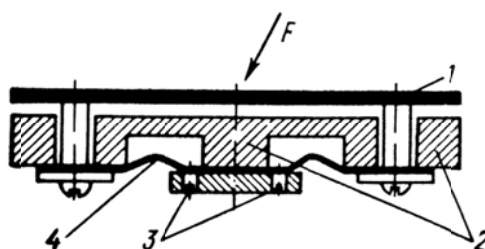


Рис. 4.35. Тактильный датчик

Часто оказывается, что площадь приложения внешнего усилия меньше площади рабочей поверхности отдельного датчика. В этих случаях измеренная величина не должна зависеть от точки приложения уси-

лия. 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. 4.35). 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 рисунке не показаны) располагаются в нескольких точках (четырех 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 преобразователей). Для большинства обычных материалов контактов оптимальное усилие составляет 0,03 Н. Следует обращать особое внимание на износостойкость 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), по их твердость и, соответственно, износостойкость 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.

В качестве тактильных датчиков можно использовать и индуктивные датчики (рис. 4.36), основанные на зависимости индуктивности системы от магнитного сопротивления зазора в магнитопроводе.

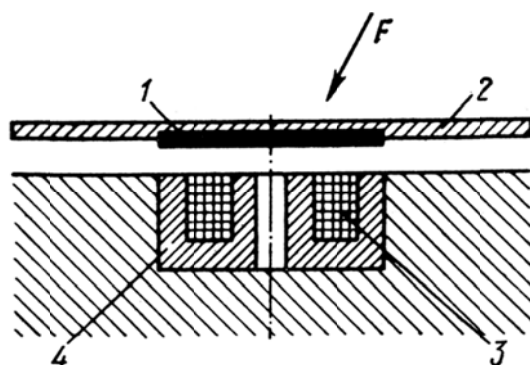


Рис. 4.36. Магнитоуправляемый контактный датчик:  
 1 – рабочая поверхность; 2 – магнит;  
 3 – магнитоуправляемый контакт; 4 – катушка

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. 4.37). 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 если кривизна поверхности не меняется слишком круто. В последнее вре-

мя 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.

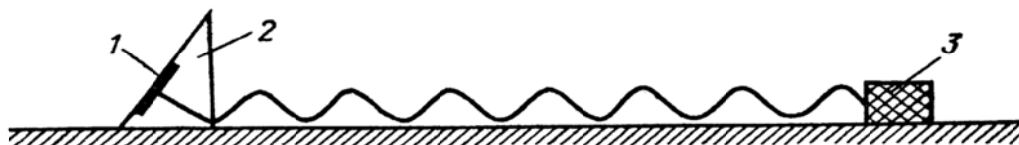


Рис. 4.37. Схема образования поверхностных ультразвуковых волн:  
1 – излучатель; 2 – призма; 3 – приемник

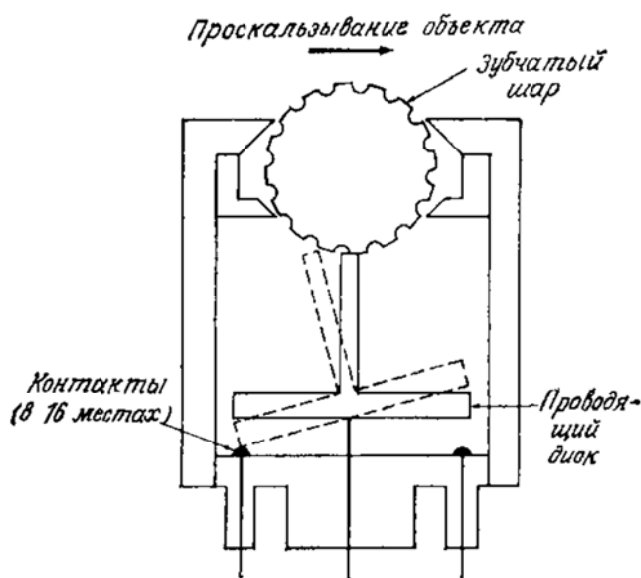


Рис. 4.38. Устройство для определения величины  
и направления проскальзывания

Рассмотренные тактильные датчики измеряют силы, перпендикулярные к чувствительной поверхности датчика. Определение проскальзывания путем измерения тангенциального движения является другой важной задачей тактильного очувствления. Датчик для определения проскальзывания включает свободно вращающийся зубчатый шар, который отклоняет тонкий стержень, установленный на оси проводящего диска (рис. 4.38). 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.

#### 4.5.9. Силомоментное очувствление

Силомоментные датчики используются в основном для определения сил реакции, возникающих при механической сборке. Основные методы в этой области направлены на очувствление 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, очувствление 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.

#### 4.5.10. Элементы датчика схвата, встроенного в запястье

Датчики представляют собой небольшие, чувствительные, легкие (~370 грамм) 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).

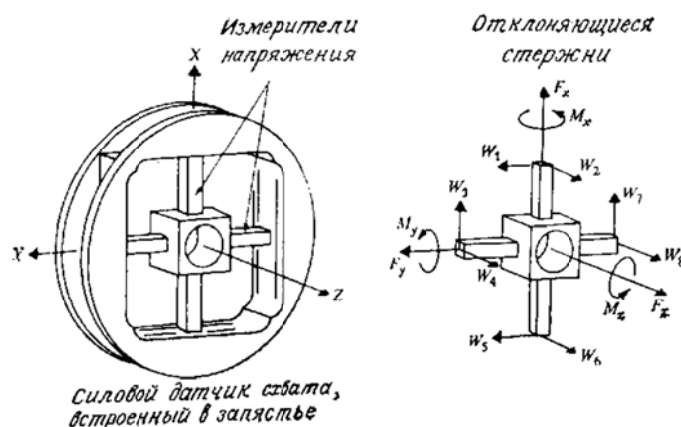


Рис. 4.39. Силовой датчик схвата, встроенный в запястье

Например, датчик, показанный на рис. 4.39, 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  $F$  и три компоненты момента  $M$  могут быть определены соответствующим сложением или вычитанием выходных напряжений (токая 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.

#### **4.5.11. Выделение сил и моментов**

Предположим, что взаимовлияние различных измерителей пренебрежимо мало, силовой датчик схвата работает в диапазоне упругих деформаций и измерители напряжения дают показания, которые линейно зависят от их отклонения. Тогда датчик выдает восемь рядов измерений, которые должны быть обработаны программным путем на ЭВМ с использованием простого метода выделения трех ортогональных компонент сил и моментов относительно системы координат датчика силы. Такая обработка может быть реализована путем определения матрицы размерностью  $6 \times 8$ , называемой матрицей разделения силы (или матри-

цей калибровки датчика)  $R_F$ , которая составляется на основе измерений силы для выделения трех ортогональных компонент силы и момента. Вектор силы, направленный вдоль координатных осей датчика силы:

$$F = R_F W,$$

где  $F = (\text{силы, момент})^T = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$ ,

$W = (\text{ряд измерений}) = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_8)^T$ ,

и

$$R_F = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{18} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{61} & \dots & r_{68} \end{bmatrix}.$$

Для датчика, представленного на рис. 4.39 матрица разделения силы по уравнению (23-2) примет вид:

$$R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} & 0 & 0 & 0 & r_{17} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 & r_{34} & 0 & r_{36} & 0 & r_{38} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 & 0 & r_{48} \\ 0 & r_{52} & 0 & 0 & 0 & r_{56} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} & 0 & r_{65} & 0 & r_{67} & 0 \end{bmatrix}.$$

Погрешность измерения сил и моментов достигает 5%. Недостатком использования силового датчика схвата, встроенного в запястье, является то, что он обеспечивает измерение векторов силы, разделяемых в процессе контакта элементов при сборке только в одной точке.

#### 4.5.12. 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.

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. 4.40) фотоэлектрического преобразователя с зубчатым диском и двумя фотодиодами, сдвинутыми один относительно другого на четверть зубцового деления. При вращении диска вправо выходной сигнал левого фотодиода опережает выходной сигнал правого; при вращении влево – наоборот. Это дает возможность, используя логиче-



ские 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.

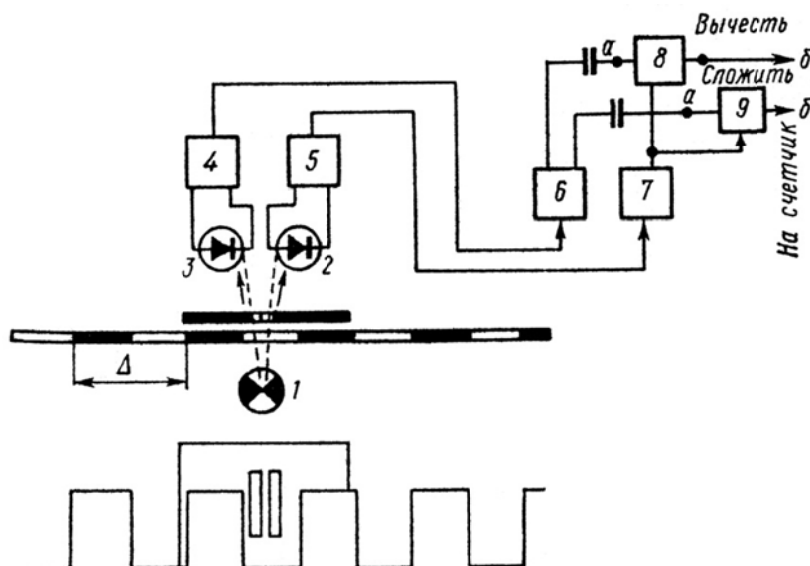


Рис. 4.40. Блок-схема фотометрического счетного датчика:

1 – источник света; 2–3 – фотодиоды;  
4–5 – усилители; 6–7 – триггеры; 8–9 – ключи

Работу простейшей логической цепи (рис. 16) иллюстрируют кривые на рис. 4.41. Счетный датчик особенно удобен для использования с цифровой ЭВМ, так как в этом случае отпадает необходимость в аналого-кодовом преобразователе.

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 тензочувствительностью (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 коэффици-

ента тензочувствительности в зависимости от уровня деформации, температуры, удельного сопротивления материала.

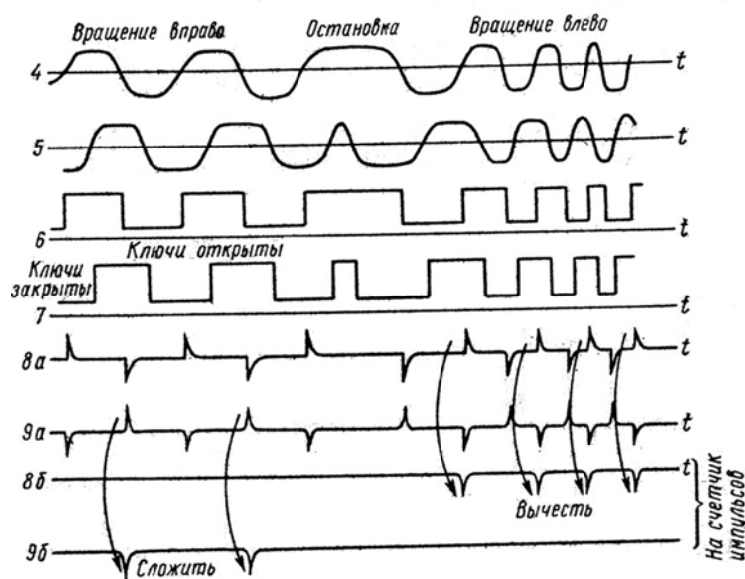


Рис. 4.41. Временная диаграмма работы фотометрического счетного датчика, изображенного на рис. 4.40:  
4, 5, 6, 7, 8, 9 – сигналы на выходе;  
8а, 9а – сигналы на входе соответствующих блоков

#### 4.5.13. Пример применения датчиков информации в роботах

Мы рассмотрели практически все типы датчиков, которыми необходимо снабдить робота 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.

Рассмотрим один из возможных простейших вариантов размещения датчиков на рабочем органе манипулятора (рис. 4.42). 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.

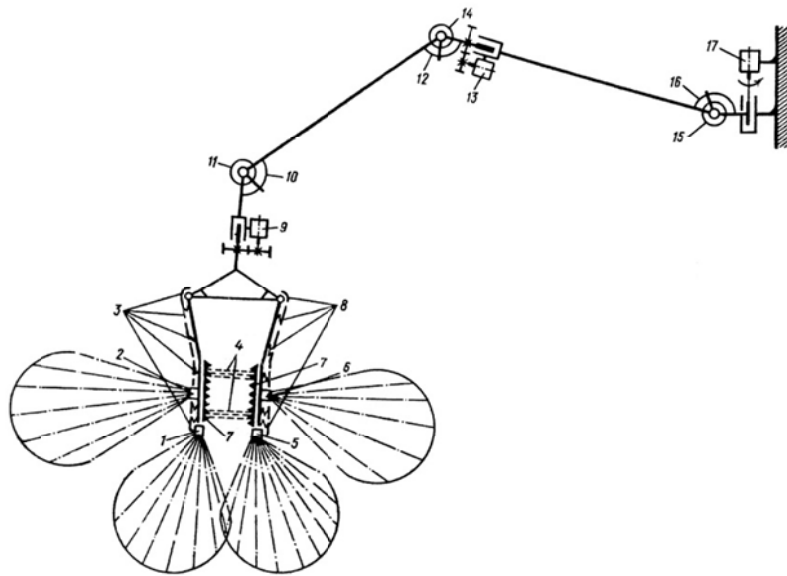


Рис. 4.42. Размещение датчиков на руке манипулятора

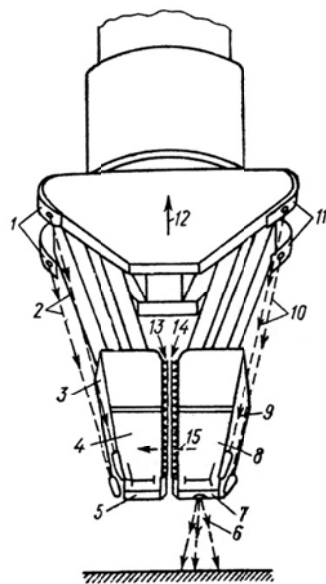


Рис. 4.43. Внешний вид схвата, оснащенного датчика

На рис. 4.43 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

силومترический датчик 12, расположенный на тяге привода пальцев схвата, выдает сигнал, пропорциональный усилию сжатия пальцев.

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. Так, 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 манипулятором, поскольку она необходима прежде всего для управления движениями руки (как сигналы обратной связи о положении звеньев).

#### **Контрольные вопросы к разделу 4**

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

- 4.6. Назовите основные способы первичного кодирования изображения.
- 4.7. Назовите основные виды обработки видеоинформации.
- 4.8. Представьте структуру матричного (клеточного) видеопроцессора.
- 4.9. Поясните принципы действия видеопроцессора пирамидального типа и видеопроцессора конвейерного типа.
- 4.10. Назовите известные вам датчики очувствления роботов в ближней и сверх ближней зонах.
- 4.11. Чем отличаются видеопроцессоры с параллельной и мультипроцессорной структурами от видеопроцессора с систолической структурой.
- 4.12. Представьте схемы индуктивного датчика.
- 4.13. Изложите принципы действия датчика Холла, емкостного датчика и порогового датчика.
- 4.14. Как функционирует ультразвуковой датчик?

#### **Список литературы к разделу 4**

- 4.1. Системы технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др. // Под. общей редакцией В.И. Сырямкина, В.С. Титова. – Томск, 1992. – 367 с.
- 4.2. Мошкин В.И. и др. Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
- 4.3. Кулешов В.И. и др. Дистанционно-управляемые роботы и манипуляторы. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.

## 5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИС

### 5.1. Введение

Важным фактором создания ИС 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 [5.1, 5.2]. К таким сложным системам относятся и ИС.

По мере развития ИС все более усложнялось их проектирование, поэтому встала задача автоматизации процесса проектирования этих систем. Но, в отличие от других технических систем, САПР для ИС получили свое развитие лишь в последние 10–15 лет [5.1, 5.4].

Проектирование – это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще несуществующего объекта, на основе начального описания (технического задания), преобразования первичного описания, оптимизация заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, коррекция начального описания и последовательное представление описаний на различных языках, разработка (изготовление и исследование) макета системы и подготовка производства [5.2, 5.3].

Как и при автоматизации проектирования любого другого устройства, САПР ИС представляет собой комплекс средств автоматизации проектирования (организационного, методического, лингвистического, информационного, математического, программного и технического обеспечения).

Основные положения такой САПР рассмотрены в настоящем разделе. В начале (п. 5.2) приводится структура САПР ИС, представляющая собой итерационный процесс, а затем (п. 5.3) детально излагается структурный синтез ИС на основе одного из перспективных методов – функционально-стоимостного анализа. При параметрическом синтезе (п. 5.4) определяется допустимая погрешность оценки координат при минимизации затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией ИС, и приводится инженерный (приближенный) расчет ИС. В заключение раздела (п. 5.5) описывается структура (состав) и программное обеспе-

чение аппаратно-программного комплекса, предназначенного для моделирования и проектирования ИС.

## **5.2. Структура САПР корреляционно-экстремальных систем**

Обобщая результаты по моделированию и проектированию корреляционных систем [5.1, 5.4], предложим следующую схему САПР ИС, изображенную на рис. 5.1. Эта схема представляет собой итерационный процесс. Проектирование ИС – это совокупность задач синтеза (выбор структуры и численных значений параметров разрабатываемых систем) и анализа (исследования синтезированной системы). Этап синтеза ИС 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 ИС, воплощенной в форме, отличной от действительной. Модели могут быть представлены в виде абстрактных математических формул (аналитическое моделирование), алгоритмов, позволяющих имитировать функционирование ИС 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 ИС 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 ИС. При этом техническое задание необходимо формализовать – привести к характеристикам, параметрам и выражениям, понятным САПР ИС.

Второй уровень проектирования называют уровнем 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 отражающая существование с позиций проектировщика свойства зрительной системы.

Поскольку часто среди вариантов структуры ИС ищется наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией, а расчет параметров, оптимальным с позиции некоторого критерия при заданной структуре ИС называют параметрической оптимизацией.

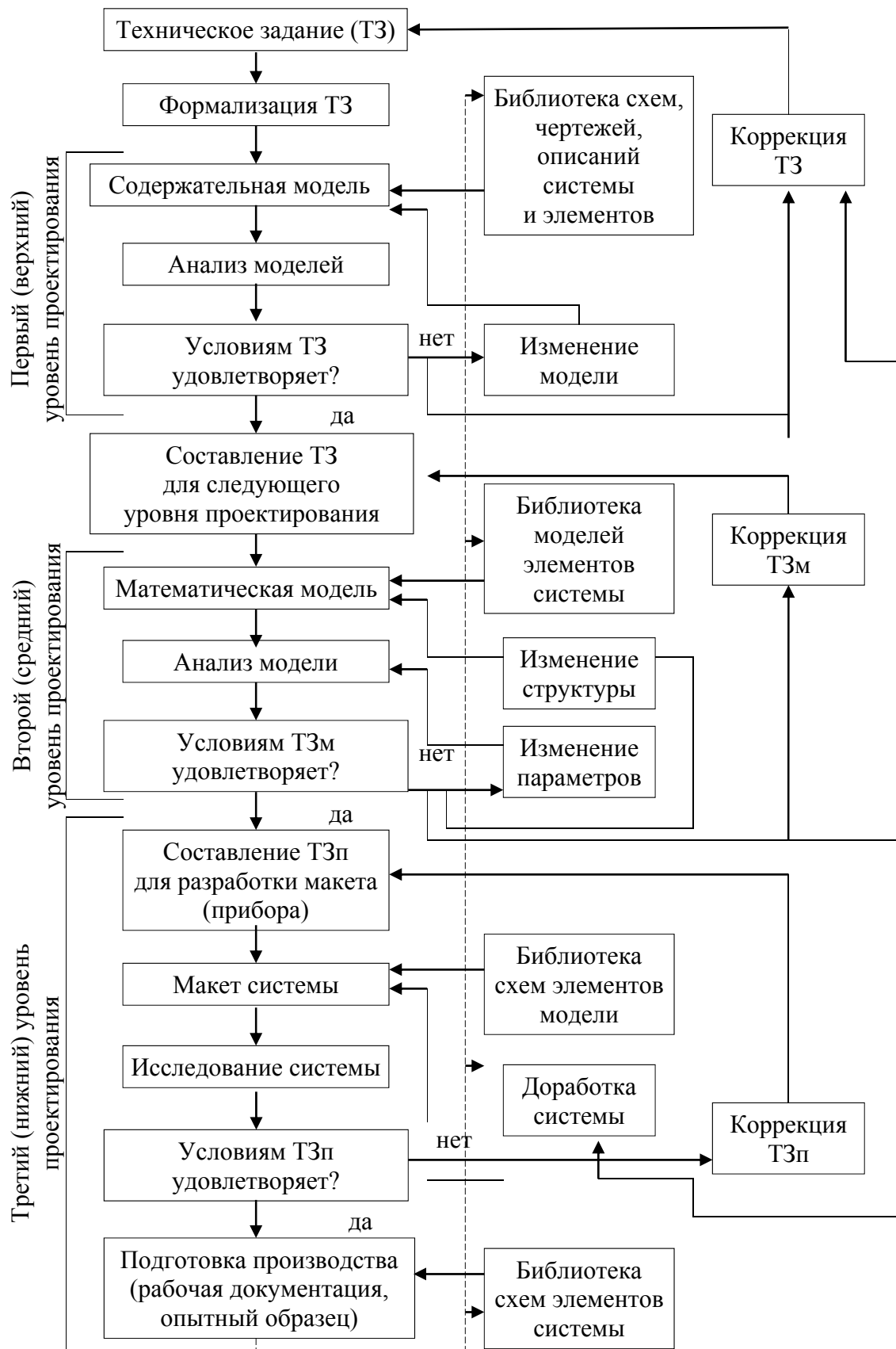


Рис. 5.1. Структурная схема САПР ИС



Если информативность содержательной модели окажется недостаточной для построения математической модели, то следует вернуться на первый уровень проектирования и декомпозировать содержательную модель по подсистемам проектируемой ИС. При выборе содержательной модели и структурном синтезе ИС следует использовать функционально-стоимостной анализ, являющийся комплексным методом, позволяющим спроектировать оптимальный вариант структуры изделия [5.4]. Синтез математической модели можно производить известными методами, используемыми в САПР [5.1]. Второй этап проектирования ИС заканчивается составлением технического задания (ТЗм) для следующего этапа проектирования ИС.

Третий (нижний) уровень проектирования должен содержать разработку ИС 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 ИС.

Следует еще раз отметить, что по результатам каждого уровня проектирования могут корректироваться (уточняться) технические задания на данный этап, либо общее ТЗ на разработку ИС (если это допустимо). После испытания макета и создания опытного образца проводится коррекция (исправление и дополнение) библиотек этапов. На рис. 5.1 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. Структурный синтез ИС на основе функционально-стоимостного анализа**

#### **5.3.1. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания ИС**

Рассмотрим вопросы применения функционально-стоимостного анализа (ФСА) для разработки ИС, используя результаты, изложенные в [5.4, 5.6]. НИР по разработке ИС 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 (см. рис. 5.2.). ФСА на ранних этапах НИР (техническое задание и техниче-

ское 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 ИС представляется целесообразным использовать в основе ФСА методы прогнозирования и экспертные методы [5.4].

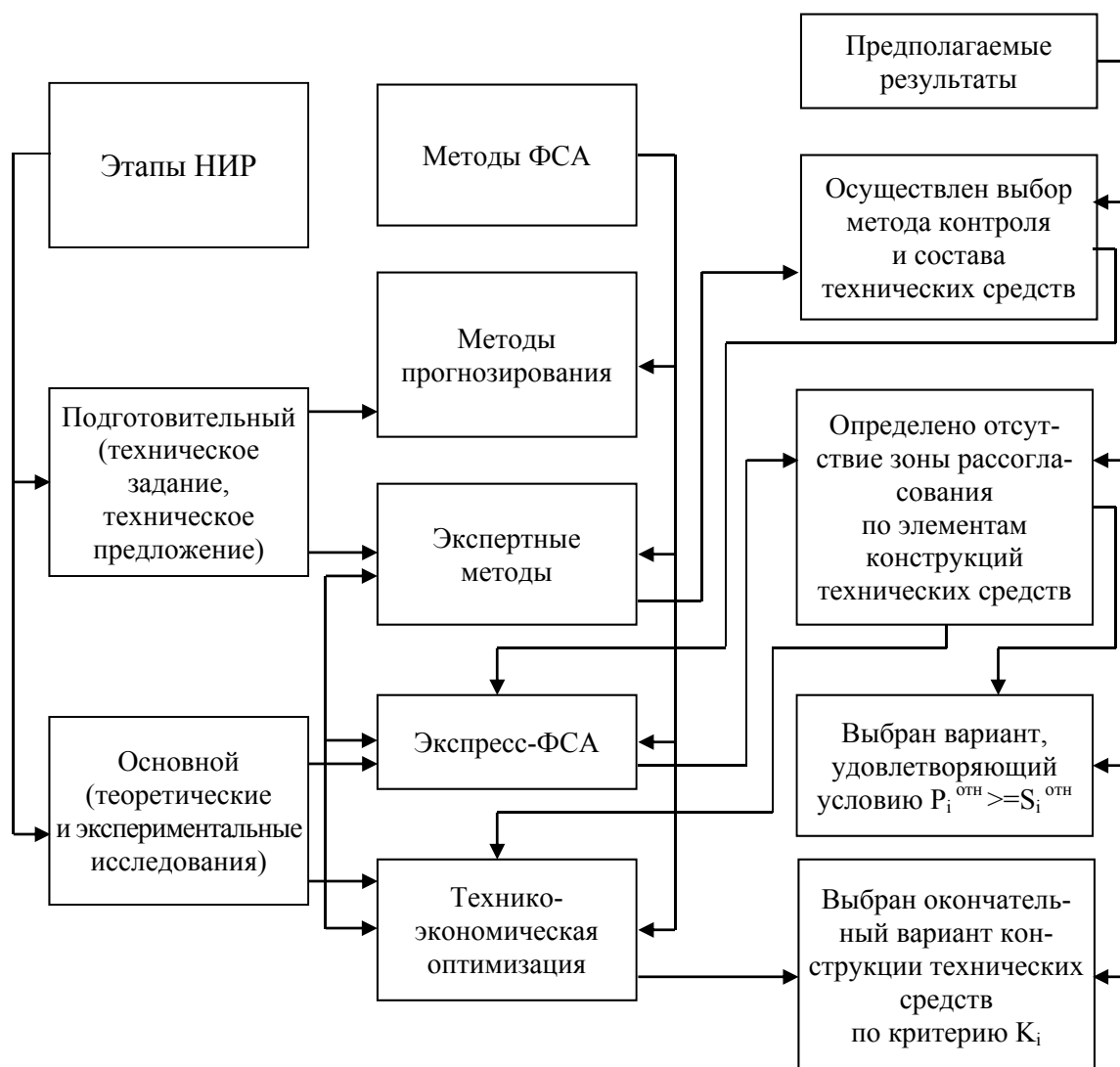


Рис. 5.2. Схема применения методов ФСА по этапам НИР

При этом для достаточного выбора приемлемого варианта структуры ИС можно использовать такой обобщающий критерий в качестве оценочного показателя каждого варианта технического решения, как условно названный показатель интегрального качества – функция потребительской стоимости проектируемого объекта. Так как абсолютный расчет потребительской стоимости ИС на ранних стадиях проектирования затруднен, поэтому его можно заменить расчетом комплексного показателя качества, представляющего собой сумму произведений значи-

мости каждого из основных для данной ИС свойств (показатель качества) на оценку величины этого свойства (степень удовлетворения свойства) в рассматриваемом варианте. Для выбора окончательного варианта ИС могут быть использованы разнообразные экспертные методы [5.4].

На последующих этапах НИР (теоретическое и экспериментальное исследования) из-за недостаточного объема информации проектируемой ИС может осуществляться по упрощенной схеме, то есть по более укрупненным этапам, представленным рис. 5.2. 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 ИС, позволяет проводить детальный анализ технического решения с целью выбора оптимального варианта проектирования на основе функционально-аналитического анализа вариантов ИС.

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, 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.

### **5.3.2. Функционально-стоимостной 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 [5.4].

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 [5.4].

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.

5. 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 [5.4, 5.6].

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 соответствовать 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 предпочти-

тельности  $A = |a_{ij}|$ , 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:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 + y, & \text{при } x_i > x_j; \\ 1, & \text{при } x_i = x_j; \\ 1 - y, & \text{при } x_i < x_j, \quad \text{где } 0 \leq y \leq 1. \end{cases} \quad (5.1)$$

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:

$$\begin{aligned} &1,9; 1,8; 1,7; 1,6; 1,5; 1,4; 1,3; 1,2; 1,1, \text{ при } x_i > x_j; \\ &1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0, \text{ при } x_i = x_j; \\ &0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9, \text{ при } x_i < x_j. \end{aligned}$$

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 сводятся в табл. 5.1.

Этап построения матрицы предпочтительности состоит из следующих операций:

- 1) введение в матрицу  $A_p$  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

$$\rho_i^{\text{отн}} = \frac{\rho_i^{pn}}{\sum_{i=1}^n \rho_{ij}^{pn}}. \quad (5.5)$$

Таблица 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

Итеративный характер расчетов при выполнении четвертого этапа может быть представлен в виде табл. 5.2.

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 четвертого этапа;
- 4) строятся матрицы предпочтительности и производятся вычисления по второму ( $X_2^{pn}$ ), третьему ( $X_3^{pn}$ ) и другим ( $X_n^{pn}$ ) параметрам.

Таблица 5.2.

## Расчет приоритета параметров

i \ J	Параметры				1-й шаг		2-й шаг	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	$\sum a_{ij}$	$\rho_i^{pn}$	$\rho_{ij}^{pn}$	$\rho_i^{omn}$
X <sub>1</sub>	1,0	0,5	1,5	0,5	3,5	0,22	13,25	0,21
X <sub>2</sub>	1,5	1,0	1,5	1,0	5,0	0,31	19,5	0,314
X <sub>3</sub>	0,5	0,5	1,0	1,5	3,5	0,22	13,75	0,22
X <sub>4</sub>	1,5	1,0	0,5	1,0	4,0	0,25	16,0	0,256
					16,0	1,0	62,5	1,0

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:

$$Q_y = \sum_{i=1}^m \rho_i^{omn} \rho_{yi}^{omn}, \quad (5.6)$$

где  $\rho_{yi}^{omn}$  – 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 ИС.

Блок-схема рассмотренного алгоритма представлена на рис. 5.3.

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.

### 5.3.3. Экспресс-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 [5.4].

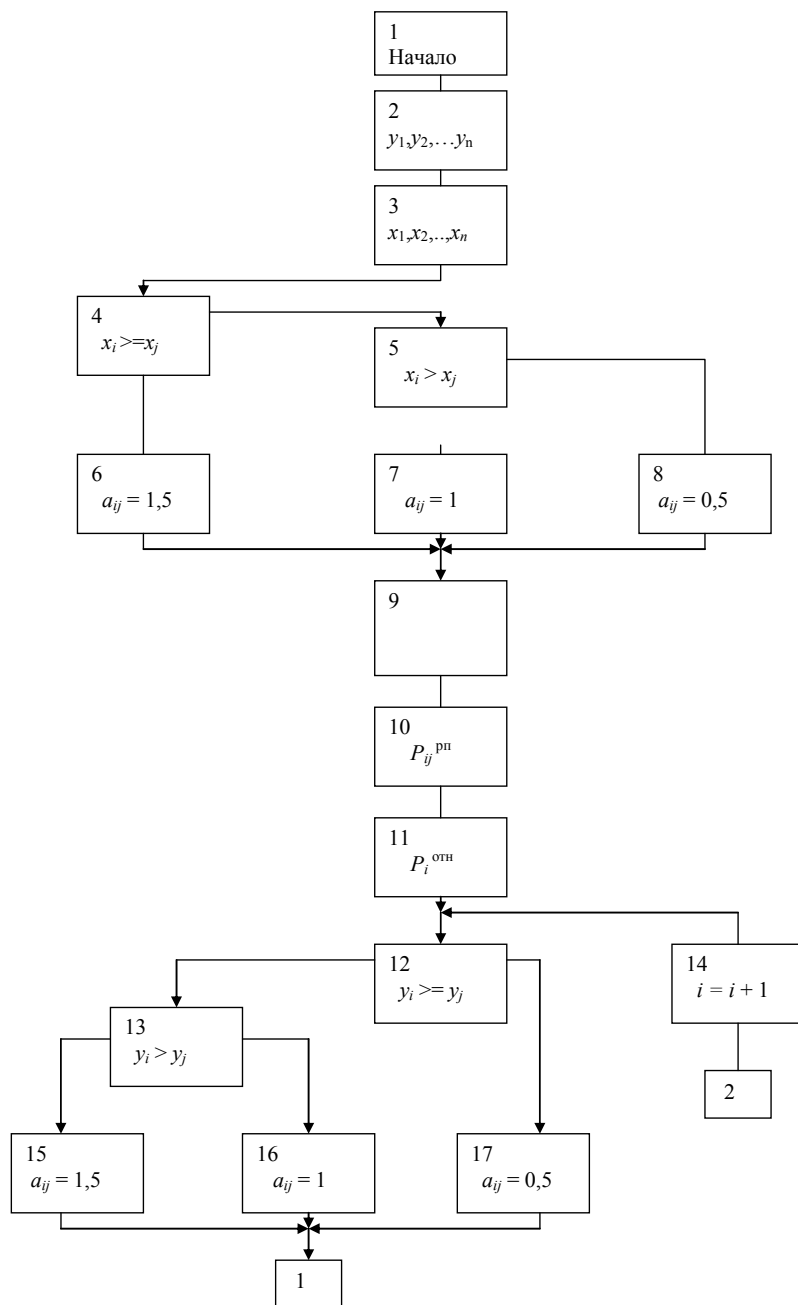
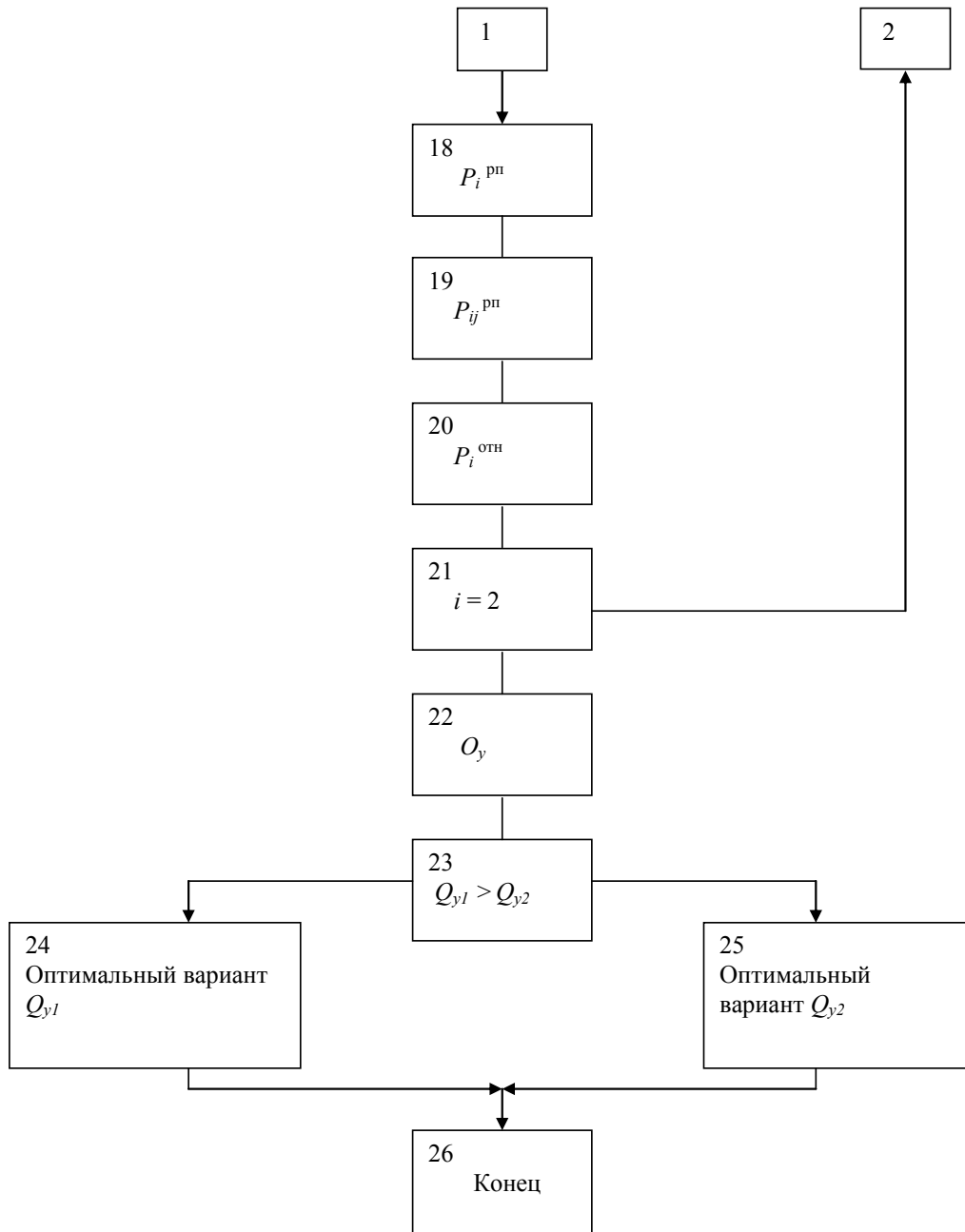


Рис. 5.3. Блок-схема алгоритма расстановки приоритетов





Продолжение рис. 5.3.

Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА дана на рис. 5.4 [5.4]. Кратко рассмотрим этот алгоритм. После выбора варианта ИС (1-й этап алгоритма) экспресс-анализ начинается с оставления структурно-элементной модели, отражающей многоуровневую связь между его составными частями (структурными элементами). Пример такой модели показан на рис. 5.5, где СЭ1, СЭ2, СЭ3, ..., СЭ422 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.



Рис. 5.4. Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА

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. 5.6.

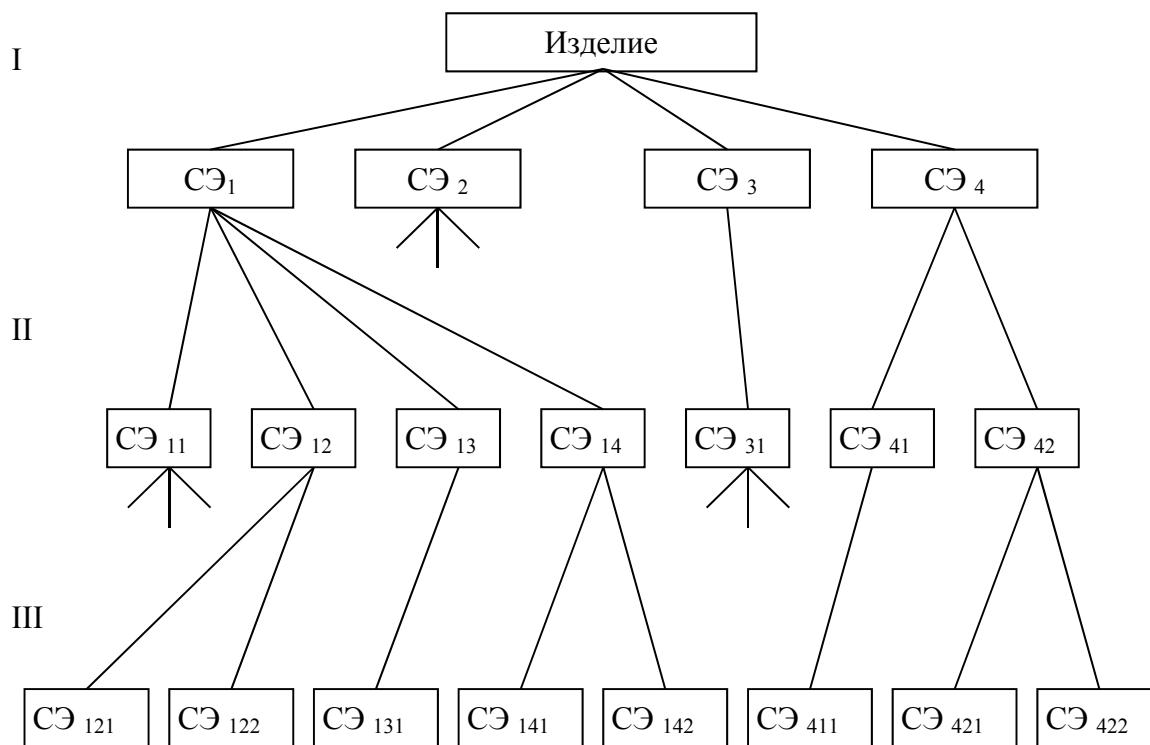


Рис. 5.5. Структурно-элементная модель

Алгоритм функционального моделирования включает в себя следующие операции: формирование внешней (главной) функции  $FГ$  (верхний уровень модели), синтез основных функций  $F_0$  и вспомогательных функций  $FB$  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.

Отметим, что максимально возможную степень детализации функций следует использовать при проведении корректирующей формы ФСА, когда каждая функция по уровням модели должна дифференци-

роваться до простейших функций, не требующих дальнейших действий для своей реализации.

Кроме отдельного структурного и функционального описания ИС при проведении ФСА требуется их совместный анализ с помощью функционально-структурной модели, на основании которой определяется функциональность и полезность материальных элементов ИС, распределение затрат по функциям и оценку 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. 5.7 (на рисунке даны те же обозначения, что и рис. 5.5, рис. 5.6). Функционально-структурная модель может быть представлена в матричной форме, где по строкам матрицы оставляются материальные элементы ИС, и по столбцам – его функции [5.4].

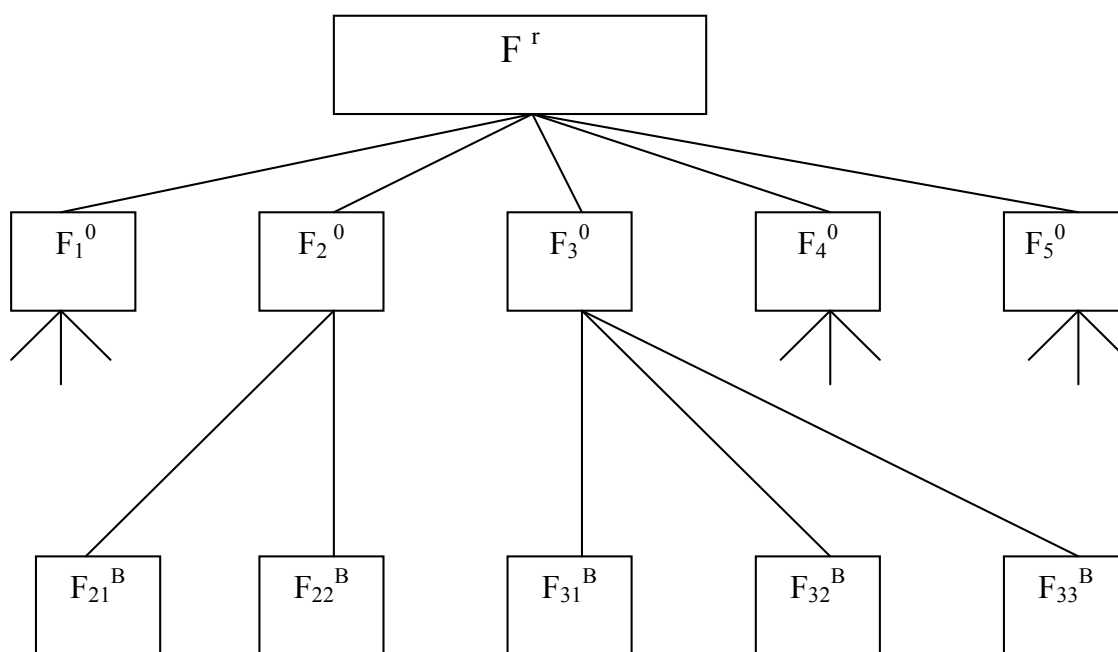


Рис. 5.6. Укрупненная функциональная модель

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, соответствующая

ющих функций данного уровня должна быть равна единице, а сами значения определяют частную весомость каждой функции ИС. Упрощение расчетов при проведении экспресс-ФСА достигается счет выделения только главной или основной функции.

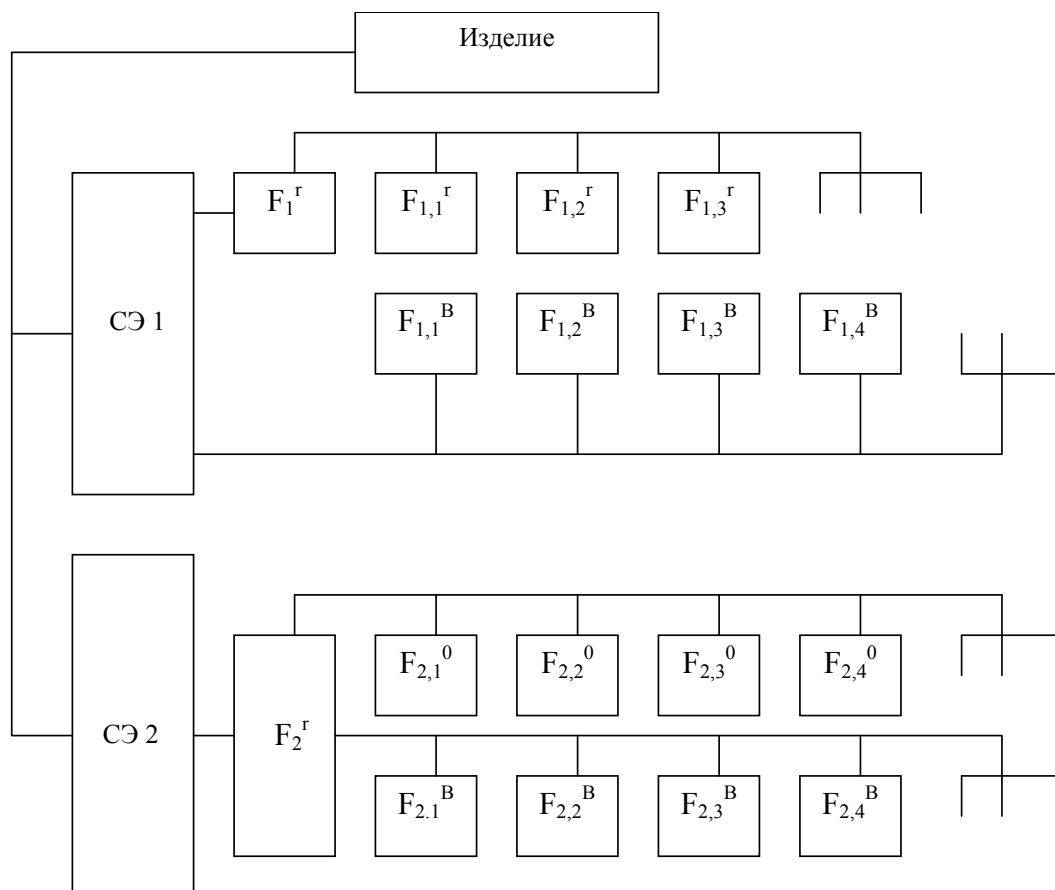


Рис. 5.7. Функционально-структурная модель

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  $i$ -ый материальный носитель  $j$ -ой функции ИС.

Если группа материальных носителей полностью обеспечивает определенную функцию, то автономные затраты находятся

$$S_{Fj} = \sum_{i=1}^p S_{mnij}, \quad (5.8)$$

где  $p$  – число материальных носителей  $j$ -ой функции.

Если структурный элемент ИС является носителем нескольких функций, то долевые затраты на материальный носитель отнесенные к данной функции, будут

$$S_{Fj} = \sum_{i=1}^p \alpha_{ij} S_{mnij}, \quad (5.9)$$

где  $\alpha_{ij}$  – коэффициент участия  $i$ -го элемента на  $j$ -ую функцию; коэффициент  $\alpha_{ij}$  определяется экспертным путем.

На последних этапах экспресс-ФСА проверяется правильность принимаемых решений путем соотнесения полезности значимости функций и размера затрат на их осуществление. Здесь проверяется отсутствие зон рассогласования, то есть  $\rho_i^{omn} \geq S_i^{omn}$ , что свидетельствует о правильном выборе варианта структуры ИС. В противном случае следует исключить неоптимальные структурные элементы из структуры ИС путем снижения затрат или усиления данного носителя функции.

#### **5.3.4. Функционально-стоимостной анализ при оптимизации структуры ИС**

Обобщая вышеизложенное в п.5.3.1, п.5.3.2, подчеркнем, выбор конкретных методов ФСА на этапах НИР и ОКР при создании ИС должен обеспечивать следующие требования: быть относительно простыми 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 следующей схемой, изображенной на рис. 5.8.

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 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 строится 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 [5.4, 5.6], 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 функций, 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 [5.4]. 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 ввиду, что в списке исполнения указаны в начале, аналоговые (или цифровые) сигналы, используемые в аналоговых и аналого-цифровых вариантах ИС, а затем – машинные коды (или язык Ассемблера), используемый 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. 5.8. 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  $1.9 \Rightarrow 2.9 \Rightarrow 3.5 \Rightarrow 5.3. \Rightarrow 5.4 \Rightarrow 6.9 \Rightarrow 7.2 \Rightarrow 8.5$ . Она соответствует ИС, обеспечивающей контроль качества монтажа навесными элементами (микросхемами, конденсаторами, резисторами), отличающимися друг от друга основным 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 может быть выполнен в виде оптического коррелятора цветных изображений или многоканального цифрового анализатора составляющих цвета. В этой ИС программы реализованы на языке Ассемблера, 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 ввиду 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 основу выбора окончательного варианта ИС использовать единство подхода только к стоимостной оценке различных вариантов, то они окажутся несопоставимыми по самым личным 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.

Таблица 5.3

## Морфологическая матрица вариантов узлов (подсистем) ИС

Индекс параметра	Морфологический признак (параметр)	Вид исполнения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Характеристики рабочей зоны (РЗ) Или объекта контроля (т. е. ОР)	Стационарная РЗ; ОР: металлургические	Подвижный конвейер; ОР: металлургические детали	Печатная плата, фотошаблон (топография)	Чертеж, схема, текст, шифт маркировка	Подвесной конвейер, крупнобаритные детали	РЗ оптического микроскопа; ОР: полупроводниковые кристаллы	Микрохема (топология)	РЗ станка с ЧПУ	Электронная плата с навесными элементами (цветными)	Листовой материал (для раскрой)
		Оптический (объектив), черно-белый	Телевизионный (видимый), черно-белый	Телевизионный (инфра-красный), черно-белый	Радиолокационный	Опτικο-локационный, черно-белый	Средотелевизионный, черно-белый	Голографический, черно-белый	Цветной, оптический (объектив)	Цветной, телевизионный	Электронный микроскоп
2	Датчик ТИ										

Продолжение табл. 5.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
3	Формирователь ТИ	На ЭЛТ	На ЗЭЛТ	На ЗЭЛТ с электронным поворотом	На оптически управляемом транспаранте	На оптически управляемом транспаранте	Устройство комбинация ЗЭЛТ и оптического управляемого транспаранта	На ПЭС-линейке, регистре	Буферное ЗУ	На ФД-линейке	ОЗУ	На ПЭС-матрице	Электронный диск	На ФД-линейке	На регистре ПЭС-линейке, ФД-линейке	На ПЭС-матрице, ФД-линейке	Электронный диск
4	Блок хранения ЭИ	Фотошленка	Маска	На оптически управляемом транспаранте	ОЗУ	ПЗУ, ОЗУ	На ПЭС-линейке, регистре	На ФД-линейке	На ПЭС-матрице	На ФД-линейке	Электронный диск	На ФД-линейке	Электронный диск	На ФД-линейке	На ПЭС-матрице, ФД-линейке	Электронный диск	

Продолжение табл. 5.3

1	5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Формирователь меры близости	ОК Берджера, Ковашнова-Армана, Майера-Эпнера	Динамический оптический коррелятор	ОК с пространственной фильтрацией помех	ОК анализа цветных изображений	Аналоговый, адаптивный, (перестраиваемый)	Цифровой, адаптивный, (перестраиваемый)	Цифровой, параллельный видео-процессор	Многоканальный, аналоговый анализатор составляющих цвета	Цифровой цветной спецпроцессор на универсальной микро-ЭВМ	Цифровой спецпроцессор с «жесткой» структурой	Многоканальный, цифровой (микропроцессорный) анализатор составляющих цвета	Многоканальный, цифровой (на универсальной микро-ЭВМ) анализатор составляющих цвета
	6	Анализатор меры близости	ОК Берджера, Ковашнова-Армана, Майера-Эпнера	Динамический оптический коррелятор	ОК с пространственной фильтрацией помех	ОК анализа цветных изображений	Аналоговый, адаптивный, (перестраиваемый)	Цифровой, адаптивный, (перестраиваемый)	Цифровой, параллельный видео-процессор	Многоканальный, аналоговый анализатор составляющих цвета	Цифровой спецпроцессор с «жесткой» структурой	Многоканальный, цифровой (на универсальной микро-ЭВМ) анализатор составляющих цвета	

Окончание табл. 5.3

1	7	Язык программирования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
8		Тип работа (системы управления (СУ) работа) или другие характеристики потребителя информации	Аналоговые (цифровые) сигналы, машинные коды	Ассемблер	Программный, позиционная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Механизм сканирования (программный, позиционная СУ на универсальной микроЭВМ)	Очувствительный (на основе ИЛП), позиционная (на микропроцессоре СУ)	Очувствительный (на основе ТВС), позиционная (на микропроцессоре СУ)	Си	Ада	Лидер	ВАЛ	
				Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ	Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ

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 является 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.

### **5.3.5. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании ИС**

#### *5.3.5.1. 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 [5.4].

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 и типоразмера;  $X_2$  – степень унификации средств контроля;  $X_3$  – производительность методов при контроле качества объектов;  $X_4$  – разрешающая способность;  $X_5$  – надежность метода контроля;  $X_6$  – характер контроля, то есть 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.

Таблица 5.4

$X_i$	$X_j$						Первый шаг		Второй шаг	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$\sum a_{ij}$	$\rho_i^{pn}$	$\rho_{ij}^{pn}$	$\rho_i^{omn}$
$X_1$	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 за-

тем – абсолютных и относительных приоритетов параметров. Причем  $b_i$  рассчитываются как и суммы  $a_{ij}$  значений, представленных в табл. 5.4, то есть  $b_1 = 5,5$ ;  $b_2 = 3,5$ ;  $b_3 = 6,5$ ;  $b_4 = 8,0$ ;  $b_5 = 7,0$ ;  $b_6 = 5,5$ . А значения  $\rho_{ij}^{pn}$ ,  $\rho_{ij}^{pn}$ , и  $\rho_i^{OTH}$  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 можно их представить в соответствующих рядах (табл. 5.5)

Таблица 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

На последнем этапе анализа по формуле (5.6) определяется качественная оценка  $Q_{y_i}$ , позволяющая дать характеристику выбранных методов контроля:  $Q_{y_1} = 0,167$ ;  $Q_{y_2} = 0,294$ ;  $Q_{y_3} = 0,251$ ;  $Q_{y_4} = 0,317$

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 контролируемый объект) является оптический метод контроля.



### 5.3.5.2. Предварительный выбор элементов структуры ИС на основе экспресс-ФСА

Покажем особенности применения экспресс-ФСА на примере предварительного выбора одного из элементов цифровой ИС – буферного 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 разделе 4 и содержит блок управления (БУ), блок памяти (БП), блок предварительной обработки (БПО), блок связи (БС) блок связи с монитором (БСМ), блок связи с ЭВМ (БС ЭВМ).

Структурно-элементная модель БЗУ выполнена в виде иерархического графа с дроблением до первого уровня структуризации (рис. 5.9) [5.4].

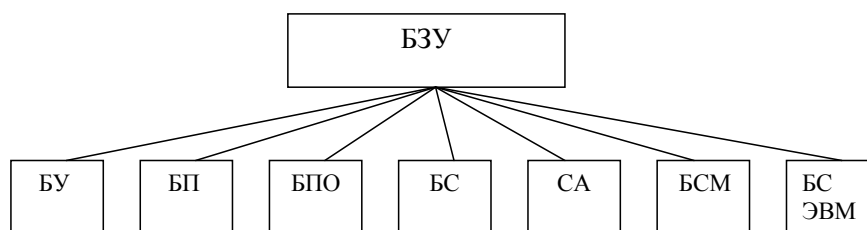


Рис. 5.9. Структурно-элементная модель буферного запоминающего устройства

На следующей операции проведения экспресс-анализа осуществляется формирование функций и построение укрупненной функциональной модели устройства (рис. 5.10). Функциональная модель содержит два уровня.

На первом уровне модели находится главная функция, определяющая назначение данного (ФГ) – передача видеoinформации от ДТИ к ЭВМ.

Второй уровень модели представляется основными функциями:

На третьем уровне укрупненной функциональной модели расположены вспомогательные функции:  $F_{11}^B$  – усиление видеосигнала;  $F_{12}^B$  – разделение (отделение) видеосигнала от строчного и кадрового синхросигналов;  $F_{13}^B$  – 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 памя-

ти;  $F_{71}^B$  – адресации записи информации;  $F_{72}^B$  – управление записью и считыванием информации.

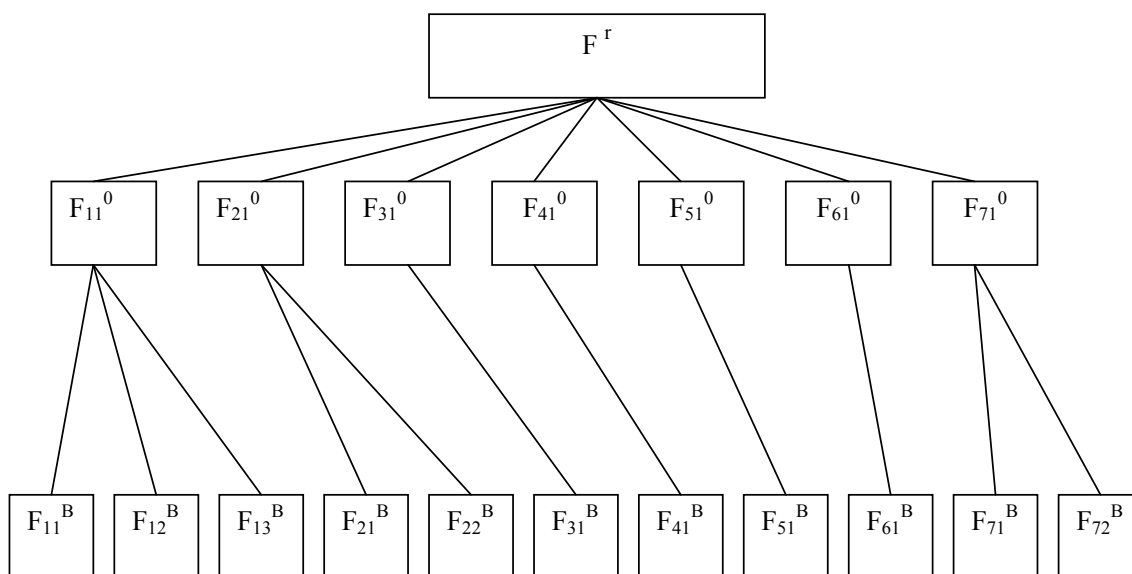


Рис. 5.10. Функциональная модель буферного запоминающего устройства  
 $F_{11}^0$  – передача информации с ДТИ в БП;  $F_{21}^0$  – синхронизация работы БП и СА;

$F_{31}^0$  – 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

С учетом содержания функций, выполняемых элементами разрабатываемого БЗУ, строится совмещенная модель (табл. 5.6).

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  $X_i^{\exists}$  только соответствующие основные функции, выполняемые элементами разрабатываемого БЗУ:  $X_1^{\exists} - F_{11}^O$ ,  $X_2^{\exists} - F_{21}^O$ ,  $X_3^{\exists} - F_{31}^O$ ,  $X_4^{\exists} - F_{41}^O$ ,  $X_5^{\exists} - F_{51}^O$ ,  $X_6^{\exists} - F_{61}^O$ ,  $X_7^{\exists} - F_{71}^O$ . Результаты экспертной оценки значимости функций ( $\rho_i^{omh}$ ) представлены табл. 5.7.

Таблица 5.6

## Функции элементов БЗУ

Элементы конструкций устройства	Содержание выполняемой функции	Код функции	Вид функции
Блок предварительной обработки (БПО)	Передает 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 синхронизацию работы БП и СА	$F_{21}^0$	основная
	Синхронизирует БПО	$F_{21}^B$	вспомогательная
	Синхронизирует БУ	$F_{22}^B$	вспомогательная
Схема адресации (СА)	Обеспечивает адресацию записываемой информации в БП	$F_{31}^0$	вспомогательная
	Синхронизирует 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 монитором (БСМ)	Обеспечивает вывод информации из БП на монитор	$F_{51}^0$	основная
Блок управления (БУ)	Осуществляет управление работой записи и считывания информации в БП	$F_{61}^0$	основная
	Обеспечивает синхронизацию СА и БП	$F_{61}^B$	вспомогательная
Блок связи с ЭВМ (БС ЭВМ)	Осуществляет согласование СА и ЭВМ	$F_{71}^0$	основная
	Осуществляет адресацию записи информации	$F_{71}^B$	вспомогательная
	Управляет записью и считыванием информации	$F_{72}^B$	вспомогательная

На следующем этапе проводимого экспресс-анализа определяется удельный вес расходов по всем структурным элементам БЗУ. На этом этапе анализа удельный вес затрат может быть также определен на основе метода расстановки приоритетов.

Таблица 5.7

Оценка уровня значимости основных функций БЗУ

$X_i$	$X_j$							Первый шаг		Второй шаг	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$\sum a_{ij}$	$\rho_i$	$\rho_{ij}$	$\rho_i^{отн}$
$X_1$	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, $\rho_i^{отн}$	0,098	0,146	0,139	0,210	0,104	0,151	0,151
Уровень относительных стоимостных затрат на функции, $S_i^{отн}$	0,20	0,05	0,05	0,50	0,05	0,05	0,10

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.

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.

#### 5.3.5.3. Выбор оптимального варианта структуры элементов ИС

Покажем особенности выбора оптимального варианта структуры ИС также, как и в п. 5.3.5.2. 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 [5.4, 5.6].

Основываясь на генеральной цели – создать новую конструкцию БЗУ – строится дерево целей и задач.

Дерево целей представляет собой форму описания требований к предъявляемым 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 условий, при которых можно 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 выдачи 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, $\rho^{отн}$	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.

Формирование вариантов разработки БЗУ осуществлялось на основе комбинирования позиций морфологической карты путем выбора одного из элементов по каждой строке матрицы (табл. 5.10). Проанализировав преимущества и недостатки и проверив на совместимость элементов, получаем следующие 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).

Из приведенной выше матрицы реализации БЗУ имеются следующие отличия. Например, первый и второй варианты отличаются реали-

зациями ( $P_{72}$ ,  $P_{73}$ ) по выводу видеоинформации на монитор (то есть второй вариант позволяет выводить на монитор цветную видеоинформацию, а первый – только черно-белую). Этими же функциями отличаются второй и третий варианты БЗУ, которые имеют также отличия в реализации блока памяти (реализации  $P_{51}$ ,  $P_{52}$ ). Таким образом, из приведенной матрицы и табл. 5.10 устанавливаются все отличия вариантов (от первого до седьмого).

Таблица 5.10

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

Каждый вариант представляет собой взаимосвязанную совокупность элементов – носителей, функционально ориентированных на выполнение 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 рассчиты-

вается 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.

Таблица 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 <sub>1</sub>	0,100	P <sub>11</sub>	1	0,100
		P <sub>12</sub>	2	0,200
		P <sub>13</sub>	3	0,300
F <sub>2</sub>	0,126	P <sub>21</sub>	2	0,252
		P <sub>22</sub>	1	0,126
		P <sub>23</sub>	3	0,378
F <sub>3</sub>	0,159	P <sub>31</sub>	2	0,318
		P <sub>32</sub>	1	0,159
		P <sub>33</sub>	3	0,477
F <sub>4</sub>	0,171	P <sub>41</sub>	1	0,171
		P <sub>42</sub>	2	0,342
		P <sub>43</sub>	3	0,513
F <sub>5</sub>	0,210	P <sub>51</sub>	1	0,210
		P <sub>52</sub>	3	0,630
		P <sub>53</sub>	3	0,630
F <sub>6</sub>	0,110	P <sub>61</sub>	2	0,220
		P <sub>63</sub>	3	0,330
F <sub>7</sub>	0,124	P <sub>71</sub>	1	0,124
		P <sub>72</sub>	3	0,372
		P <sub>73</sub>	2	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
	$P_{13}$	$P_{23}$	$P_{33}$	$P_{43}$	$P_{53}$	$P_{63}$	$P_{73}$	
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 (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  $k_{y\partial_i}$ :  $k_{y\partial_i} = 737,13$ ;  $k_{y\partial_i} = 773,33$ ;  $k_{y\partial_i} = 865,05$ .

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 корреляционно-экстремальных систем

### 5.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию ИС

Требование к точностным характеристикам ИС определяет стоимость  $C$  изготовления системы и последующие затраты (потери)  $\Pi$  на ее эксплуатацию. Величина  $N=C+\Pi$  может служить характеристикой общих затрат на изготовление и эксплуатацию ОТИЗ. Допустим, что точностные характеристики ОТИЗ определяются величиной дисперсии  $\sigma^2$ , 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 ИС, т. е.

$$\sigma_{don}^2 = \underset{\sigma^2}{extr} N(\sigma^2). \quad (5.10)$$

Для решения уравнения (5.10) применим метод безусловной оптимизации [5.1, 5.2], 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  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\alpha_i$  распределены по нормальному закону [5.7]. Известны методы прогнозирования стоимости при наличии аналога выпускаемой аппаратуры (РЭА) [5.4, 5.5], но из-за отсутствия аналогов ИС, внедренных 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  $\sigma^2$  приводит к сложности и, следовательно, стоимости ИС. В качестве функции с отмеченными свойствами выберем следующую функцию:

$$C(\sigma^2) = \frac{K}{\sigma^2},$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий возможную плату за единичное повышение точности определения искомым координат. Величины  $K$

и ( $\sigma^2$ ) зададим следующим образом:  $K = C_{np}\sigma_1^2$ ;  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ , где  $\sigma_1^2$  – дисперсия определения искомых координат, обусловленная внутренними шумами системы, характеризуемая предельной (максимальной) стоимостью  $C_{np}$ ;  $\sigma_2^2$  – дисперсия определения координат, обусловленная наличием помех на ТИ. Таким образом, в качестве функции  $C(\sigma^2)$  будем использовать следующее соотношение:

$$C(\sigma^2) = \frac{C_{np}\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (5.11)$$

Вид этой функции будет различным для ИС, планируемых, к выпуску в серийном производстве, и для ИС, запускаемых в конструкторскую проработку и опытное производство. В первом случае стоимость  $C(\sigma^2)$ , как и любой другой РЭА, определяется и расходами, а во втором случае зависит себестоимости  $C(\sigma^2)$  конструкторской разработки, включающей и затраты на научные исследования. Определим вид функции потерь  $\Pi = \Pi(\sigma^2)$ . Если ИС способна распознавать ОР и оценивать его положение, то можно предложить использование функции потерь, в которой при правильном распознавании средние потери пропорциональны дисперсии и параметров:

$$\Pi(\sigma^2) = K_n \sigma^2 = \frac{\Pi_{\max}}{\sigma_{\max}^2} \sigma^2, \quad (5.12)$$

где  $K_n$  – угловой коэффициент, равный отношению максимальных потерь  $\Pi_{\max}$  к максимальной дисперсии  $\sigma_{\max}^2$ , то есть, если ИС имеет погрешность  $\sigma_{\max}^2$ , 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  $\sigma_{\text{дон}}^2$  ИС выбиралась из условия  $\sigma_{\text{дон}}^2 < \sigma_{\max}^2$ . Максимальные потери  $\Pi_{\max}$  определяются следующим образом:

$$\Pi_{\max} = \sum_{i=1}^{n=4} \Pi_i,$$

где  $\Pi_1$  – стоимость ремонтно-восстановительных работ при обслуживании ПР;  $\Pi_2$  – стоимость ремонтно-восстановительных работ для оборудования,

обслуживающего ПР;  $\Pi_3$  – потери, обусловленные простым ПР и обслуживающего оборудования;  $\Pi_4$  – 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:

$$\sigma_{\text{don}}^2 = \operatorname{argmin}_{\sigma^2} N(\sigma^2). \quad (5.13)$$

Предполагая, что функция  $N(\sigma^2)$  унимодальная вычислим производную от  $N(\sigma^2)$  по  $(\sigma^2)$ , приравняем ее нулю и разрешим относительно  $(\sigma^2)$ . В результате получим

$$\sigma_{\text{don}}^2 = \left( \frac{C_{np}\sigma_1^2\sigma_{\max}^2}{\Pi_{\max}} \right)^{1/2}. \quad (5.14)$$

Для иллюстрации рассмотренного способа выбора допустимых точностных характеристик ИС, соответствующих минимуму затрат, конкретизируем выражение (5.11) для аналогового, аналого-цифрового и цифрового вариантов ИС, которые описываются в 6-м разделе. Расчеты показывают, что ИС, обладает погрешностью  $(\sigma^2)=9\%$  от размера анализируемых изображений имеет стоимость  $C_1(\sigma^2)=1300\$$ . При этом предельные затраты оцениваются как  $C_{np} = 1800$  руб. В этом расчете учитывается ожидаемая экономическая эффективность внедрения в промышленность ПР, оцувствленного ИС. Подставляя эти данные (5.11), получим:

$$c(\sigma^2) = 11,7 \cdot 10^3 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{-1} \$. \quad (5.15)$$

При конкретизации функции потерь предположим, что условные значения  $\Pi_{\max}$  равны 3000 \$ и 8500 \$ для  $\sigma_{\max}^2 = 4\%$ . Далее предпола-

гая, 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. 5.11: здесь 1 – соответствует  $\Pi_{\max} = 3000$  \$, а 2 –  $\Pi_{\max} = 8500$  \$. 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. 5.11 увеличение затрат на эксплуатацию ИС приводит к более жестким требованиям по точностным характеристикам ИС.

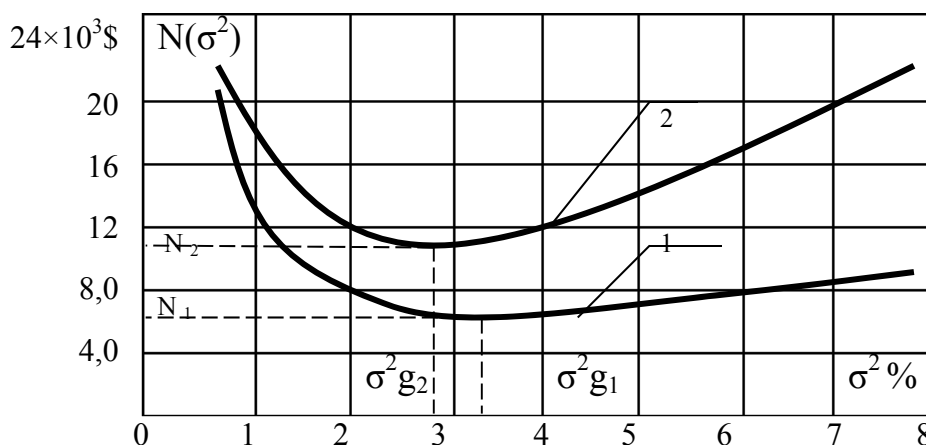


Рис. 5.11. Графики функций общих затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией ИС

## 5.4.2. Инженерный (приближенный) расчет ИС

### 5.4.2.1. Расчет емкости памяти ИС

Определение объема видеoinформации, перерабатываемой ИС.

Известно [5.1, 5.8], что возможное количество комбинаций  $C_1$  формируемых (воспроизводимых) цветных изображений при прочих равных параметрах значительно (в  $n_{\text{цв}} = m_1^{2M_{\text{И}}N_{\text{И}}}$  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 [5.1, 5.9].

Причем, количество информации  $I_{ц}$ , содержащейся в цветном изображении, в три раза превышает количество информации  $I_{чб}$ , содержащейся в изображении черно-белом, то есть [5.7]

$$\frac{I_{ц}}{I_{чб}} = \frac{\log_2 C_1}{\log_2 C_2} = 3 \log_2 m_1^{M_u N_u}. \quad (5.17)$$

Если известно число  $N_э$  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 [5.7] в следующем виде:

$$\begin{aligned} I_0 &= N_k N_э (\log_2 m_1 + \log_2 m_2) = \\ &= N_k M_э (\log_2 m_1 + \log_2 m_3 + \log_2 m_4). \end{aligned} \quad (5.18)$$

При использовании каких-либо методов сжатия информации (преобразования изображения в точечное или контурное) в выражении (5.18) число  $N_э$  нужно вычислять

$$N_э = \frac{S_u}{S_э} = \frac{l' b'}{S_э}, \quad (5.19)$$

где  $S_u$ ,  $S_э$  – 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 определяются простой формулой

$$ПА = ПТИ + ПЭИ + ПАР \quad (5.20)$$

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

$$N_R^{\text{ЭИ}} = \frac{I_O}{n_\sigma} = \frac{S_\Sigma^{\text{ЭИ}}}{S_i^{\text{ЭИ}}}, \quad (5.21)$$

где  $n_\sigma$  – 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.

**Оценка емкости памяти цифровых ИС.** В зависимости от способа ввода информации в память микрокомпьютера, на базе которого реализуется цифровая ИС, данные системы делятся два типа: системы со считыванием изображения в буферное ЗУ (программный ввод) и системы со считыванием изображения прямым доступом к памяти микрокомпьютера [5.1, 5.10].

Если используется первый режим ввода информации, то емкость памяти  $П_{Ц}$  находится при известных емкостях памяти буферного запоминающего устройства  $П_{БЗУ}$  и микроЭВМ  $П_{ЭВМ}$  следующим образом:  $П_{Ц} = П_{БЗУ} + П_{ЭВМ}$  (5.22)

Очевидно, что при использовании второго режима ввода информации величина  $П_{Ц}$  определяется в виде  $П_{Ц} = П_{ЭВМ}$ . При этом емкость памяти микроЭВМ, которую можно отвести для загрузки программного обеспечения зрительной системы для первого и второго режимов считывания изображения находятся соответственно по следующим формулам:

$$П_1 = П_{Ц} + П_{ОС}, \quad П_2 = П_{Ц} - П_{ОС} - П_{И}, \quad (5.23)$$

где  $П_{ОС}$  – емкость памяти, необходимая для записи операционной системы;  $П_{И}$  – емкость памяти, требуемая для записи изображения [5.1, 5.10].

Первый режим ввода изображения более экономичен и дает возможность отводить большую емкость памяти под программы обработки изображений, то есть позволяет иметь программное обеспечение для решения более сложных задач.

Емкость памяти ОЗУ ЭВМ для размещения средств программного обеспечения определяется известным выражением (без учета емкость памяти ПОС) [5.10]

$$\Pi_{\text{ПО}} = \sum_{k=1}^k \Pi_{\text{РПК}} + \Pi_{\text{СП}} + \Pi_{\text{ПТК}}, \quad (5.24)$$

где  $\Pi_{\text{РПК}}$  – емкость памяти, занимаемая  $k$ -ой рабочей программой;  $\Pi_{\text{СП}}$  – емкость памяти, занимаемая стандартными программами;  $\Pi_{\text{ПТК}}$  – 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:

$$M^{\text{БЗУ}} \leq M^{\text{ДТИ}}; \quad N^{\text{БЗУ}} \leq N^{\text{ДТИ}}, \quad (5.25)$$

где  $M^{\text{БЗУ}}, N^{\text{БЗУ}}$  – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце буферного ЗУ;  $M^{\text{ДТИ}}, N^{\text{ДТИ}}$  – соответственно, число элементов разложения изображения в строке и столбце датчика ТИ.

Причем для считывания квадратного раstra изображения необходимо выполнить следующее условие:  $M^{\text{БЗУ}} = N^{\text{БЗУ}}$ .

Если известны число  $N_{\text{И}}$ ,  $M_{\text{И}}$  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:

$$\Pi_{\text{ЦП}} = N_{\text{К}} M_{\text{И}} N_{\text{И}} g, \quad (5.26)$$

где  $M_{\text{И}} = X_{\text{max}} / \Delta X$ ,  $N_{\text{И}} = Y_{\text{max}} / \Delta Y$ ;  $X_{\text{max}}, Y_{\text{max}}$  – максимальные (предельно допустимые) линейные размеры считываемого изображения;  $\Delta X, \Delta Y$  – разрешающая способность оценки линейных размеров объектов.

Используя (5.26), легко вычислить емкость памяти БЗУ и ЭД, то есть

$$\Pi_{\text{БЗУ}} = N_{\text{К}} M^{\text{БЗУ}} N^{\text{БЗУ}} g; \quad \Pi_{\text{ЭД}} = N_{\text{К}} M^{\text{ЭД}} N^{\text{ЭД}} g, \quad (5.27)$$

где  $M^{\text{ЭД}}, N^{\text{ЭД}}$  – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце электронного диска.

Емкости памяти видеопроцессора, ППЗУ и внешних накопителей определяются объемом перерабатываемой видеоинформации, их реализацией и вычисляются по известным методикам [5.10]. 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 пикселах анализируемой информации) для записи видеосигнала в БЗУ.



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					
Число градаций яркости изображения, $m$	2	32×32	64×64	128×128	256×256	512×512	1024×1024	32×32	64×64	128×128	256×256	512×512	1024×1024	32×32	64×64	128×128	256×256	512×512	1024×1024
	4	2	8	32	128	512	2048	4	16	64	256	1024	4096	6	24	96	384	1536	6144
	8	4	16	64	256	1024	4096	8	32	128	512	2048	8192	16	64	256	1024	4096	16384
	16	6	24	96	384	1536	6144	12	48	192	768	3072	12288	18	72	288	1152	4608	18432
	32	8	32	128	512	2048	8192	14	56	224	896	3584	14336	20	80	320	1280	5120	20480
	64	10	40	160	640	2560	10240	16	64	256	1024	4096	16384	22	88	352	1408	5632	22528
	128	12	48	192	768	3072	12288	18	72	288	1152	4608	18432	24	96	384	1536	6144	24576
	256	14	56	224	896	3584	14336	20	80	320	1280	5120	20480	26	104	416	1664	6656	26624
	512	16	64	256	1024	4096	16384	22	88	352	1408	5632	22528	28	112	448	1792	7168	28672
	1024	18	72	288	1152	4608	18432	24	96	384	1536	6144	24576	30	120	480	1920	7680	30720
	20	80	320	1280	5120	20480	26	104	416	1664	6656	26624	32	128	512	2048	8192	32760	

В заключение приведем следующую методику расчета емкости памяти ИС.

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  $N_{чбп}$ ,  $N_{чбо}$ ,  $N_{цп}$ ,  $N_{эик}$  ИС аналогового или аналого-цифрового типа.
3. Оценить в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений по формулам (5.22) ÷ (5.23), (5.25) ÷ (5.28) емкость памяти  $P_{ц}$  зрительной системы и емкость памяти ПБпзу, Позу, ПВП, ПППзу, ПЭд, ПВП элементов ИС 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 ИС

Очевидно, что требования к быстродействию ИС определяется из требований к производительности робота или другого технологического оборудования, использующего эту зрительную систему. В общем случае быстродействие робототехнической системы, включающей ИС, робот и средства формирования рабочей зоны, оценивается простым выражением

$$T_{pc} = T_{сфрс} + T_{ис} + T_p, \quad (5.29)$$

где  $T_{сфрс}$ ,  $T_{ис}$ ,  $T_p$  соответственно время (постоянные времени) формирования рабочей зоны, определения необходимой информации ИС 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:

$$T_{ис} \leq T_{pc} - (T_{сфрс} + T_p), \quad (5.30)$$

$$T_{pc} \leq T_{цк},$$

где  $T_{цк}$  – длительность одного цикла производственного конвейера (или длительность одного цикла смены рабочей зоны).

Быстродействие ИС определяется в общем виде суммированием слагаемых времени, затрачиваемых каждым узлом зрительной системы на выполнение своей функции, то есть

$$T_{\text{ОТИС}} = \sum_{i=1}^{m=7} t_i^{3c}, \quad (5.31)$$

где  $t_1^{3c}, t_2^{3c}, t_3^{3c}, t_4^{3c}, t_5^{pc}, t_6^{pc}, t_7^{pc}$  – соответственно время (длительность) реализации своих функций ДТИ, НТИ, ФМБ, АМБ, БХЭИ, ЭИ и УА зрительной системы.

Здесь следует отметить, что длительности времени  $t_5^{pc}$  и  $t_6^{pc}$  учитывают только временные затраты в цикле БХЭИ и ЭИ при подаче необходимой эталонной информации в ФМБ (то есть без полной смены ЭИ, когда работают только БХЭИ и ЭИ, а остальные узлы ИС находятся в режиме останова).

Из (5.31) следует очевидный вывод, что быстродействие можно повысить либо путем уменьшения времени обработки информации каждым узлом зрительной системы, либо путем организации параллельных вычислений подсистемами ИС.

Дальнейший расчет быстродействия целесообразно проводить, для разных типов ИС, анализирующих различные классы изображений.

***ИС, обрабатывающие двумерные, черно-белые изображения.***

Быстродействие этой ИС определяется по формуле (5.22) в соответствии с конструктивной и схемной реализацией блоков цельной системы.

Так как быстродействие ИС обуславливается скоростными характеристиками технологического процесса, поэтому расчет быстродействия ИС целесообразно производить в динамическом режиме [5.1]. При этом следует учитывать прежде всего то, что скорость выдачи информации ИС задается допустимой дискретностью отсчета  $\Delta r_{xy}^g, \Delta r_{\alpha}^g$  линейных и угловой координат соответственно, то есть

$$\Delta r_{xy}^g = \frac{V_k}{t_{\text{цк}} + t_{\text{цр}}}, \quad \Delta r_{\alpha}^g = \omega_g t_{\text{цк}}, \quad (5.32)$$

где  $V_k$  – скорость движения объекта на конвейере;  $t_{\text{цр}}$  длительность цикла работы ПР;  $\omega_g$  – угловая скорость поворота объекта в плоскости конвейера;  $t_{\text{цк}}$  – быстродействие ИС. Из (5.32) находим

$$t_{\text{цк}} = \frac{V_k \Delta r_{xy}^g t_{\text{цр}}}{\Delta K_{xy}^g}; \quad t_{\text{цк}} = \frac{\Delta r_{\alpha}^g}{\omega_g}, \quad (5.33)$$

где  $t_{\text{цк}}$  выбирается меньшее из двух значений. Величина  $\Delta r_{xy}^g$  вычисляется как

$$\Delta r_{xy}^g = \left( \Delta x_{cp}^2 + \Delta y_{cp}^2 \right)^{1/2}, \quad (5.34)$$

где  $\Delta x_{cp}$ ,  $\Delta y_{cp}$  – смещение объекта по соответствующим осям за время  $t_{цк}$ .

Ясно, что, чем меньше допустимые значения  $\Delta x_{cp}$ ,  $\Delta y_{cp}$  тем выше должны быть скоростные свойства ИС и ПР. С другой стороны максимальное быстродействие ИС имеет предельное значение, ограниченное максимально допустимой скоростью перемещения изображения по полю фотокатода фотоприемника телекамеры  $V_{ДТИ}^{ДОП}$ . Превышение этой скорости ведет к появлению эффекта «смазывания» изображения. Такой эффект будет наблюдаться, если

$$C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} < V_{ТИ}^{ДОП} < C_2^n V_K \quad \text{или} \quad V_{ТИ}^{ДОП} < C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} < C_2 V_K, \quad (5.35)$$

где  $C_1^n$ ,  $C_2^n$  – коэффициенты пропорциональности.

Из (5.35) следует, что при выполнении условия

$$C_1^n V_{ТИ}^{ДОП} \geq V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_2^n V_K \quad \text{или} \quad V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} \geq C_2 V_K \quad (5.36)$$

эффекта «смазывания» изображения не будет и верхний предел быстродействия будет определяться предельными скоростными характеристиками остальных блоков ИС.

Быстродействие ИС аналого-цифрового типа определяется в основном аналогично ИС аналогового типа по формулам (5.31) ÷ (5.36) с добавлением методики расчета быстродействия ввода и обработки изображения микроЭВМ, изложенной ниже.

Быстродействие ИС цифрового типа оценивается по формуле

$$T_{ОТИС}^{ПЦЧБ} = \sum_{i=1}^{n=8} t_i^{ПЦЧБ}, \quad (5.37)$$

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 требуемого освещения рабочей зоны ( $t_1^{ПЦЧБ}$ ), 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

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = \tau_{\text{ТК}}, \quad (5.38)$$

где  $\tau_{\text{ТК}}$  – период повторения кадров ТК. Выражение (5.38) можно представить в другом виде

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}}, \quad (5.39)$$

$M^{\text{ТИ}}, N^{\text{ТИ}}$  – 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:

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} \tau_{\text{ТК}i} = N_{\text{ТК}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТК}}} M_i^{\text{ТИ}} N_i^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}i}, \quad (5.40)$$

где  $\tau_{\text{ТК}i}$  – период повторения кадров  $i$ -ой ТК;  $N_{\text{ТК}}$  – количество ТК;  $\tau_{\text{Э}i}$  – время передачи  $i$ -го элемента ТИ  $i$ -ой ТК.

В случае применения в ТК режима, «электронного окна» размером  $M_0^{\text{ТК}} \times N_0^{\text{ТИ}}$  время  $t_3^{\text{ПЦЧБ}}$  уменьшается за счет уменьшения объема воспринимаемой информации.

Время считывания ТИ в буферное запоминающее устройство  $t_4^{\text{ПЦЧБ}}$  определяется временем ввода ( $t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}}$ ) и предварительной  $j$ , обработки изображения ( $t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}}$ )

$$t_4^{\text{ПЦЧБ}} = t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}} + t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}}. \quad (5.41)$$

Так как ввод ТИ в БЗУ производится синхронно с формированием ТИ телевизионной камерой, поэтому длительность  $t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}}$  можно вы-

числить по формулам (5.38)÷(5.40). Время обработки видеoinформации находится по формуле

$$t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N_{\text{ТИ}} \tau_{\text{ЭОБР}} = N_{\text{К}}^{\text{ТИ}} t_{\text{КОБР}} \quad (5.42)$$

где  $\tau_{\text{ЭОБР}}$  – время обработки  $i$ -го элемента ТИ;  $N_{\text{К}}^{\text{ТИ}}$  – число кадров ТИ;  $t_{\text{КОБР}}$  – период обработки кадра ТИ.

Длительность считывания ТИ из БЗУ в ЭВМ зависит от реализации БЗУ и в общем случае определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} t_5^{\text{ПЦЧБ}} = & N_{\text{БЗУ}} N_{\text{БЗУ}}^{\text{К}} [t_{\text{СТЛ}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + t_{\text{СТР}} M^{\text{ТИ}} + \\ & + t_{\text{НСТЛ}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + t_{\text{НСТР}} M^{\text{ТИ}} + t_{\text{ПД}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + \\ & + t_{\text{БП}} (M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + M^{\text{ТИ}})], \end{aligned} \quad (5.43)$$

где  $N_{\text{БЗУ}}$  – количество БЗУ;  $N_{\text{БЗУ}}^{\text{К}}$  – количество ТИ, записанных БЗУ;  $t_{\text{СТР}}$  – время пересылки числа, соответствующего первой координате строки;  $t_{\text{СТЛ}}$  – время пересылки числа, соответствующего первой координате столбца;  $t_{\text{ПД}}$  – время пересылки  $N_p$ -разрядного слова данных;  $t_{\text{НСТЛ}}$  – время наращивания адреса координат столбца;  $t_{\text{НСТР}}$  – время наращивания адреса координат строки;  $t_{\text{БП}}$  – время безусловного перехода адреса координат.

Из анализа (5.80) следует, что 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 (5.43) для выбора БЗУ различного типа. Например, параметры  $N_{\text{БЗУ}} = N_{\text{БЗУ}}^{\text{К}} = 1$ ,  $N_p = 4$  соответствуют реализации БЗУ, осуществляющего считывание полутонового изображения, а параметры  $N_{\text{БЗУ}} = N_{\text{БЗУ}}^{\text{К}} = 1$ ,  $N_p = 2$  – реализации БЗУ, обеспечивающего считывание контурного ТИ.

Быстродействие обработки информации на видеопроцессоре носит от производительности вычислительной структуры и сложности программного обеспечения. В общем виде быстродействие видеопроцессора определяется следующим образом:

$$t_6^{\text{ПЦЧБ}} = t_{\text{ВК}} + t_{\text{ПОИСК}} + t_{\text{СЛ}} = \tau_{\text{БЗУ}} + n_{\text{В}} \frac{K_1}{N_{\text{КВП}} t_{\text{T}}} + \frac{K_2}{N_{\text{КПВ}} f_{\text{T}}}, \quad (5.44)$$

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,  $K_1 = 20, \dots, 100$ ;  $K_1$  – коэффициент, характеризующий сложность программы работы видеопроцессора (устанавливается для конкретного типа видеопроцессора);  $f_{\text{T}}$  – тактовая частота видеопроцессора (или его блоков, осуществляющих параллельную обработку ТИ);  $N_{\text{КВП}}$  – число параллельных каналов видеопроцессора.

Графики, иллюстрирующие расчетное быстродействие видеопроцессора, приведены на рис. 5.12 и рис. 5.13, схема приведена в разделе 4. Отметим, что графики получены для худшего случая (сложного изображения, требующего большие временные затраты 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.

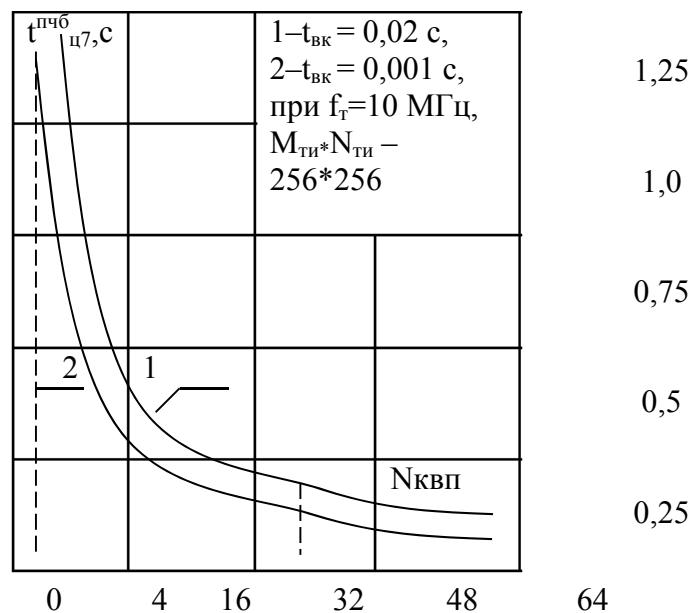


Рис. 5.12. Зависимость времени обработки ТИ от числа каналов видеопроцессора ( $f_{\text{T}} = 10 \text{ МГц}$ )

Значение времени  $t_7^{\text{ПЦЧБ}}$  зависит от сложности вычислительных операций, реализующих алгоритм работы ЭВМ, а также времени выборки информации из ППЗУ и ЭД в процессор ЭВМ. Время передачи

информации из ППЗУ в процессор рассчитывается по известной методике [5.10], а время выборки ЭИ из ЭД в процессор определяется по формуле (5.43).

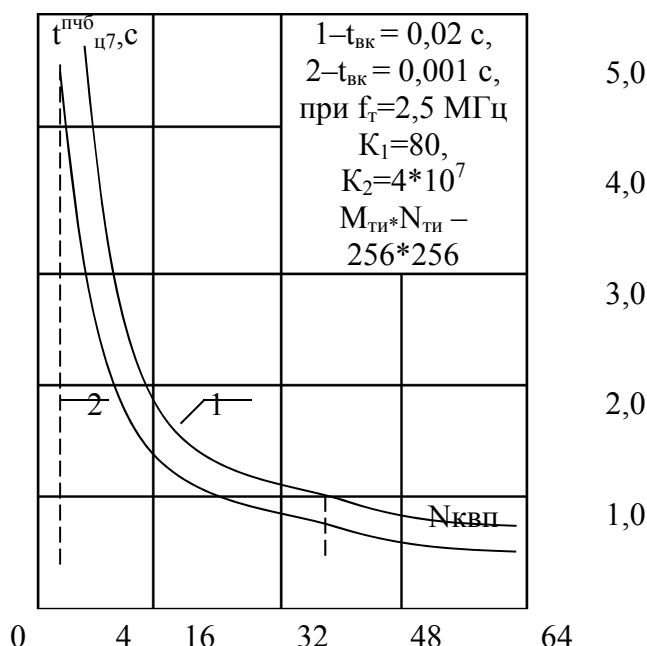


Рис. 5.13. Зависимость времени обработки ТИ от числа каналов видеопроцессора ( $f_m = 2,5 \text{ МГц}$ )

Временные затраты на запись информации и выполнение необходимых функций (например, перезапись ТИ из ОЗУ ЭВМ в НТМД или передача (прием) видеoinформации из ЭВМ по вычислительной сети) определяется по известным методикам [5.10].

ИС, анализирующие трехмерные, черно-белые изображения. В начале оценим быстродействие ИС с оптическим коррелятором и аналоговой или аналого-цифровой обработкой сигнала. Здесь, как указано в 2-м разделе, наиболее возможны две реализации ИС: 1) с двумя ТК и одним оптическим коррелятором; 2) с двумя ТК и накопителями ТИ и одним оптическим коррелятором.

Для первого случая реализации ИС быстродействие зрительной системы определяется по формуле

$$T_{ОТИС}^{ОЧБ1} = 2 \sum_{i=1}^{N_{БЛ}} t_i^{ОЧБ1} + t_{ОК}^{ОЧБ1}, \quad (5.45)$$

где  $t_i^{ОЧБ1}$  – время работы блоков ИС;  $N_{БЛ}$  – число блоков ИС (в формуле ТК следует учитывать только один раз);  $t_{ОК}^{ОЧБ1}$  – время оценки (или уточнения) координат.



Для второго случая реализации ИС быстродействие определяется следующим образом:

$$T_{\text{ОТИС}}^{\text{ОЧБ2}} = 2 \sum_{i=1}^{N_{\text{ТИ}}} t_i^{\text{ОЧБ2}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{ОБЛ}}} t_j^{\text{ОЧБ2}}, \quad (5.46)$$

где  $t_i^{\text{ОЧБ2}}$  – время работы  $i$ -го блока, участвующего в считывании формировании первого и второго изображений; ПТИ – количество блоков, обеспечивающих считывание и формирование первого и второго изображений;  $t_j^{\text{ОЧБ2}}$  – время работы  $j$ -го блока, осуществляющего формирование и анализ корреляционных акций; ОБЛ – количество блоков, обеспечивающих формирование и анализ корреляционных функций (включая получение окончательной информации).

Быстродействие ИС цифрового типа, использующих один, два или три датчика, следует определять по формулам (5.37) ÷ (5.43). При этом необходимо учитывать количество ТК, БЗУ, ТИ и ЭИ.

**ИС, обрабатывающие двумерные, цветные изображения.** В начале вычислим быстродействие ИС с оптическим коррелятором (с аналоговой или аналого-цифровой обработкой сигнала). Возможны два варианта реализации такой ИС: 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, то есть:

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А1}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{бр}}} t_i^{\text{ПЦ,А1}} + N_{\text{ЦФ}} t_{\text{ЦФ}}^{\text{ПЦ,А1}}, \quad (5.47)$$

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{бк}}} t_i^{\text{ПЦ,А2}}, \quad (5.48)$$

где  $t_i^{\text{ПЦ,А1}}$  – время выполнения требуемой функции  $i$ -ым блоком (без операции разделения цвета);  $n_{\text{бр}} = N_{\text{ОЭ}} - 1$ ,  $N_{\text{ОЭ}}$  – общее число элементов зрительной системы;  $N_{\text{ЦФ}}$  – число сменяемых цветофильтров;  $t_{\text{ЦФ}}^{\text{ПЦ,А1}}$  – время смены цветофильтра;  $t_i^{\text{ПЦ,А2}}$  – время выполнения требуемых функций  $i$ -ым блоком одного из канала зрительной системы;  $n_{\text{бк}}$  – наибольшее число блоков одного из каналов зрительной системы.

Как следует из анализа выражений (5.47), (5.48) быстродействие второго (многоканального) варианта ИС характеризуется более высоким

быстродействием за счет выполнения параллельной обработки информации. Для повышения быстродействия первого (одноканального) варианта ИС следует уменьшить время смены цветофильтров (то есть увеличить скорость смены цветофильтров) или уменьшать число цветофильтров.

В случае использования ИС цифрового типа, сравнивающей двумерные цветные изображения, быстродействие  $T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,И}1}$  зрительной системы рассчитывается по формулам (5.37)÷(5.43).

**ИС, анализирующие трехмерные цветные изображения.** Напомним, что здесь возможны реализации зрительной системы на оптическом корреляторе или в цифровом виде. Причем ИС первого варианта строятся на двух ДТИ и двух оптических корреляторах, а ИС второго варианта – на одном, двух или трех датчиков ТИ.

В зависимости от исполнения ИС определим быстродействие зрительной системы. Для первого варианта реализации время получения необходимой информации определяется формулами

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,А1}} = T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А1}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}, \quad (5.49)$$

$$T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,А2}} = T_{\text{ТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}, \quad (5.50)$$

где  $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}$ ,  $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}$ , – соответственно, быстродействия блоков принятия решений, вычисляющих пространственные координаты объектов.

Подчеркнем здесь, что формула (5.49) соответствует ИС одноканальным оптическим корреляторам, а формула (5.50) – многоканальным оптическим корреляторам.

При построении цифровых ИС, сравнивающих трехмерные цветные изображения, быстродействие  $T_{\text{ТИС}}^{\text{ОЦ,Ц}}$  зрительной системы рассчитывается по формулам (5.37)÷(5.43). При этом необходимо учитывать время, затрачиваемое на вычисление пространственных координат.

#### 5.4.2.3. Методика расчета ИС

При выборе конструктивных параметров ИС 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  $\Delta x_{\text{max}}$ ,  $\Delta y_{\text{max}}$ ,  $\Delta x_{\text{cp}}$ ,  $\Delta y_{\text{cp}}$  в рабочей хоне 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)÷(5.28).
4. Определить  $\Phi_r$  при выбранных типах электронно-лучевых и полупроводниковых приборах, устанавливаемых соответственно в индикаторах ТИ и ДТИ.
5. Вычислить по формулам (5.29)÷(5.50) требуемое быстродействие системы.
6. Задать погрешность установки датчика ТИ в соответствии с неравенством (5.19).
7. 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  $\delta_H$ , возникающие из-за взаимной ориентации объекта, датчика ТИ или вследствие неравномерной освещенности плоскости конвейера с объектом. В этом случае сначала определяется величина  $\delta_H$ , а затем выполняются п. 1–7.

## **5.5. Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для моделирования, проектирования и настройки ИС**

### **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 [5.1]:

- 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 с звездообразной топологией ЭВМ (одна центральная ЭВМ (ПЭВМ) и шесть периферийных ЭВМ (ПЭВМ1, ..., ПЭВМ6)) [5.10]. При организации сети используется локальная сеть передачи данных CMNET, работающая под управлением операционной системы РТ-11 (РАФОС) 5-й вер-

сии и реализующая доступ к удаленным дискам периферийных ЭВМ. В состав АПК входят следующие изделия (см. рис. 5.14).

УВСИУС – устройство ввода среднеформатных изображений с участка сцены; УВСИОМ – устройство ввода среднеформатных изображений с оптического микроскопа; УВСКИ – устройство ввода среднеформатных контурных изображений; УВИКФ – устройство ввода изображений корреляционных функций; УВСЦИ – устройство ввода среднеформатных цветных изображений; УАМОИ – устройство ввода малоформатных объемных изображений; УВИБФ – устройство ввода изображений большого формата; ОС – оптическая система; ТК – телевизионная камера; ВМ – видеомаягнитофон; 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. Описание всех изделий устройств ввода изображений АПК содержится в 5-м разделе. При настройке подсистемы ИС используются черно-белый цветной мониторы, а также программаторы ППЗУ и имитаторы команд микроЭВМ [5.10].

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 видеомаягнитофона обеспечивает запись и воспроизведение динамических изображений, необходимых для тестирования и моделирования быстроменяющихся технологических процессов.

Одним из основных параметров АПК является производительность  $P$ , которая определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{I_{OC}}{t_{апк}}, \quad (5.51)$$

где  $I_{oc}$  – количество (суммарное) информации, перерабатываемое АПК (определяется по формуле (5.18));  $t_{апк}$  – время, которое оценивается  $P$ .

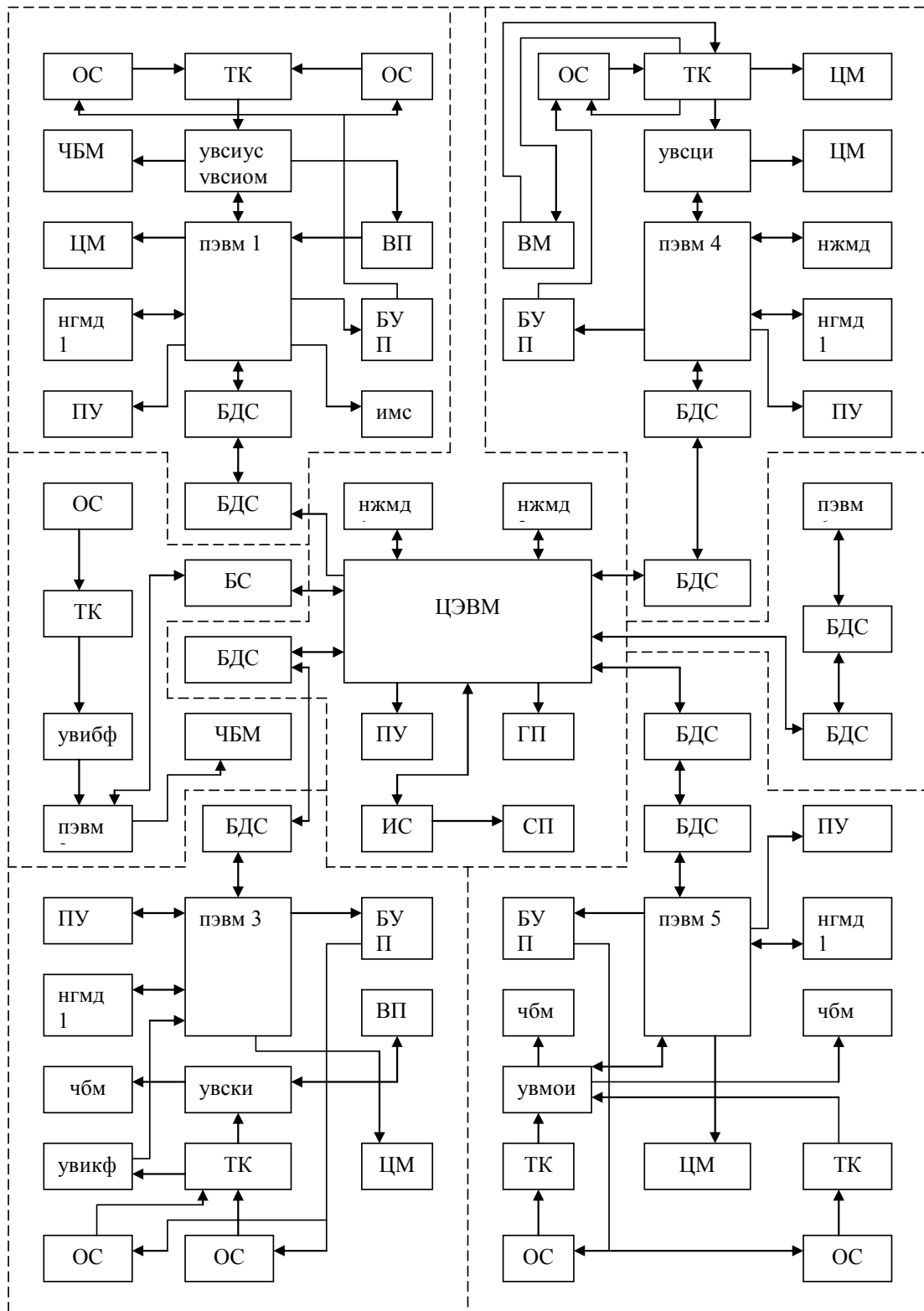


Рис. 5.14. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

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)

**5.5.2. Структура программного обеспечения**

АПК обладает развитым программным обеспечением (ПО) по обработке и анализу изображений, моделированию, проектированию и расчету ИС, исследованию эффективности алгоритмов и структур ИС. Структура ПО дана на рис. 5.15. ПО состоит из восьми пакетов (модулей) программ, каждая из которых реализует один из методов обработки или исследования изображений, также какую-либо сервисную функцию (обработка изображений, исследование и коррекция изображений, редакци-

рование изображений, сравнение изображений, проектирование ИС, управление объединенных головной устройствами, настройка ИС, обмен информацией) [5.1]. 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, 11, 12, 13, 14 – соответственно пороговая, анизотропная, рекуррентная, строчная, медианная фильтрации ТИ; 15, 16, 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, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 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 цветных 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 ДТИ); 38 – коррекция масштабных искажений ТИ; 39 – коррекция цветных искажений ТИ; 40 – моделирование черно-белых изображений; 41 – моделирование цветных изображений; 42 – редактирование черно-белых изображений; 43 – редактирование цветных изображений; 44, 45, 46, 47, 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 ИС на основе Функционально-стоимостного анализа; 59 – параметрический синтез ИС; 60 – оценка допустимой погрешности определения координат

при минимизации затрат на создание и эксплуатацию ИС; 61, 62, 63, 64 – соответственно расчеты светотехнические, оптические, быстродействия, объема памяти; 65 – расчет корреляторов; 66 – методика расчета ИС; 67 – моделирование подсистем ИС; 68 – моделирование структуры ИС; 69, 70, 71 – соответственно явление механизмами смещения (сканирования), подъема-опускания, фиксации (метки); 72, 73, 74 – соответственно управление нижней, верхней подсветками и адаптация подсветки 75, 76, 77, 78, 79 – соответственно управление видеопроцессором, буферным запоминающим устройством, электронным диском, ППЗУ; 80 – оценка статистических характеристик погрешности ИС; 81 – поверка ИС; 82 – тестовые; 83 – имитирующие (команды ЭВМ); 84 – программирование ППЗУ; 85 – проверки программатора; 86, 87 – соответственно запись изображения на ГМД, НМД (и считывание обратно в АПК); 88, 89, 90 – соответственно вывод изображения (или другой информации) на АЦПУ, графопостроитель и двухкоординатный потенциометр; 91, 92 – соответственно, копирование программ с ГМД, НМД.

Такая организация ПО способствует максимальной «открытости» пакета, представляя возможность расширять и модифицировать его в процессе эксплуатации.

Структура ПО определяется требованиями, предъявляемыми к ИС, и позволяет синтезировать архитектуру и произвести расчет параметров ИС, последовательно выполнить все этапы обработки видеoinформации, выбирая для каждого из них оптимальный (по быстродействию, точности работы или другим требованиям) алгоритм обработки ТИ.

Процесс моделирования ИС включает в себя этап имитационного моделирования изображений и этап имитационного моделирования зрительных систем применительно к технологической задаче. Этап имитационного моделирования изображений рассматривается с позиции моделирования цветных изображений, включающих в себя и черно-белые (монохромные) изображения [5.1].

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) [5.1, 5.9]. Разработанный АПК отличается от известных тем, что позволяет обрабатывать анализировать изображения различных размерностей и цветностей, анализировать корреляционные функции и проектировать ИС различного назначения.



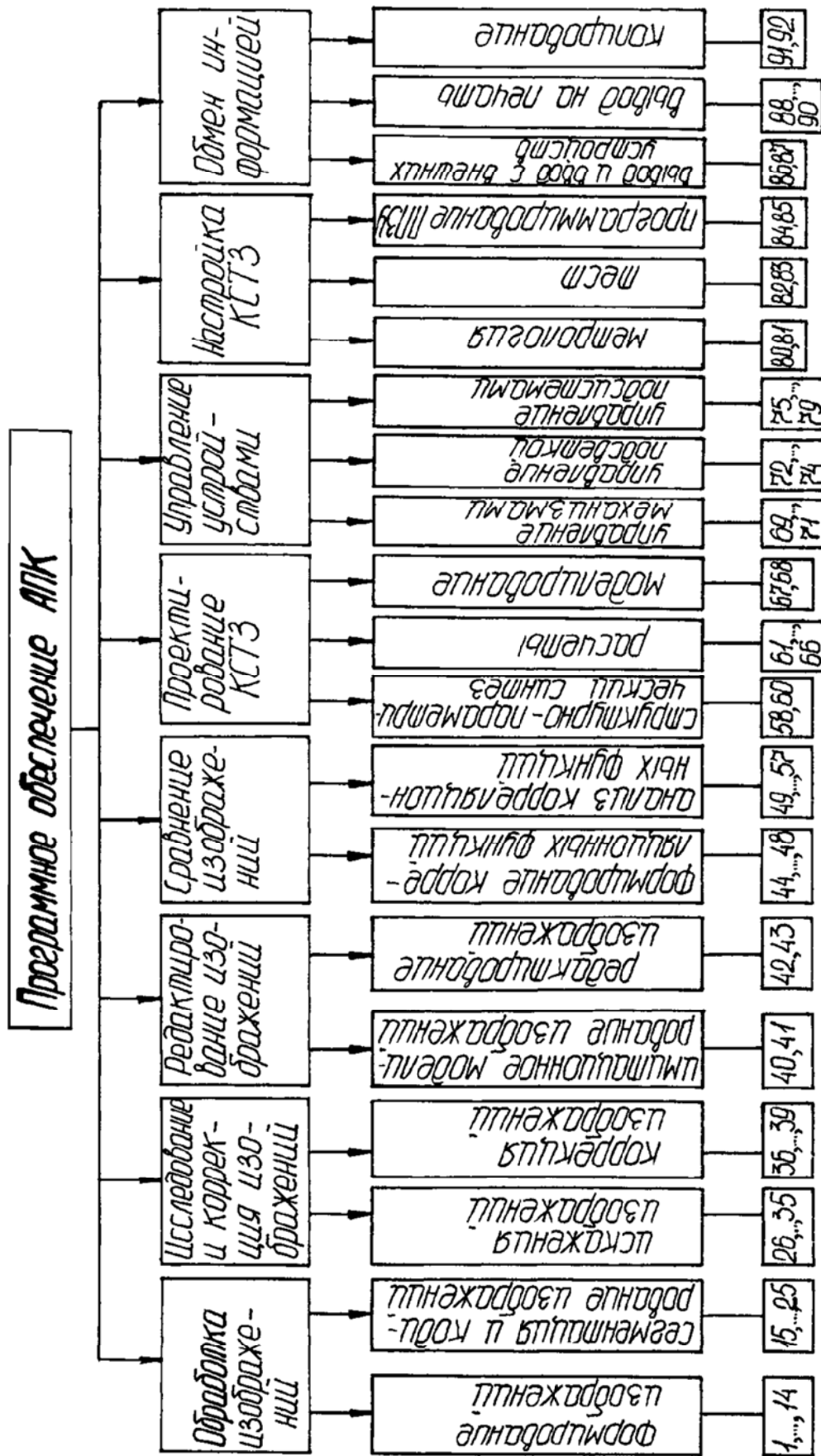


Рис. 5.15. Структура программного обеспечения аппаратно-программного комплекса обработки и анализа изображений

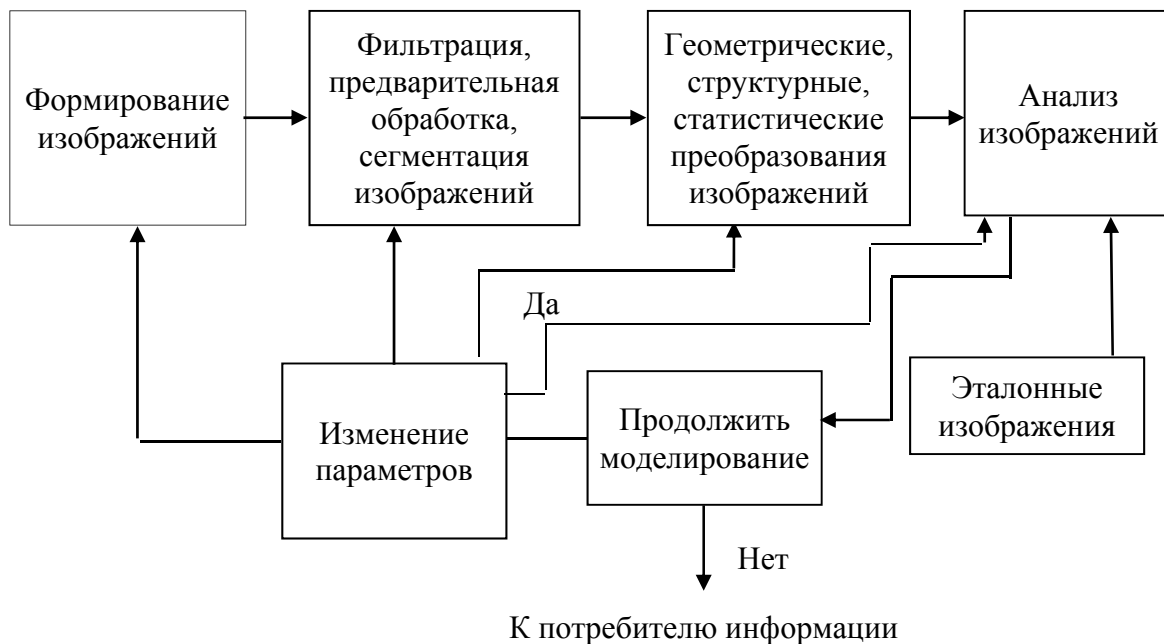


Рис. 5.16. Схема имитационного моделирования изображений аппаратно-программным комплексом

## Контрольные вопросы к разделу 5

- 5.1. Дайте определение и укажите назначение САПР ИС.
- 5.2. Перечислите уровни и элементы структурной схемы САПР ИС.
- 5.3. Дайте определение структурной и параметрической оптимизации, применяемых в САПР ИС.
- 5.4. Поясните методику структурного синтеза ИС на основе функционально-стоимостного анализа.
- 5.5. Изложите схему применения методов функционально-стоимостного анализа.
- 5.6. Поясните алгоритм проведения функционально-стоимостного анализа, реализующий метод расстановки приоритетов.
- 5.7. Приведите блок-схему экспресс-ФСА и объясните её работу.
- 5.8. Поясните особенности ФСА при оптимизации структуры ИС. Приведите блок-схему алгоритмов ФСА при решении оптимизационных задач.
- 5.9. Приведите примеры применения ФСА при проектировании ИС.
- 5.10. Как производится оценка погрешности определения координат объекта при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию ИС.
- 5.11. Приведите расчёт объёма видеoinформации перерабатываемой ИС.
- 5.12. Приведите расчёт памяти ИС.
- 5.13. Приведите расчёт быстродействия. ИС.
- 5.14. Изложите методику расчёта ИС применительно к системам технического зрения роботов.

- 5.15. Какие основные составные элементы и программное обеспечение программно-аппаратного комплекса проектирования ИС.

### **Список литературы к разделу 5**

- 5.1. Системы технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенко и др. // Под. общей редакцией В.И. Сырямкина, В.С. Титова. – Томск, 1992. – 367 с.
- 5.2. Норенков И.П. Введение в Автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высшая школа, 1980. – 311 с.
- 5.3. Комплекс общепромышленных руководящих методических материалов по созданию АСУ и САПР. – М.: Статистика, 1980. – 119 с.
- 5.4. Титов В.С., Сырямкин В.И., Ширабакина Т.А. Техничко-экономический анализ разработки средств визуального контроля: учебное пособие. – Курск. Курск. гос. техн. ун-т. 1995. – 98 с.
- 5.5. Скорняков Э.П., Шведова В.В., Мельникова Л.И. Оценка технического уровня продукции – необходимое условие выхода на рынок. Учебное пособие. – М.: Институт промышл. собст. и инноватики, 1993. – 88 с.
- 5.6. Моисеева Н.К., Карпухи М.Г. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: учебное пособие. – М.: Высш. шк. 1988. – 192 с.
- 5.7. Тихонов В.И, Статистическая радиоэлектроника. – М.: Сов. Радио, 1966.
- 5.8. Узилевский В.А. Передача обработка и воспроизведение цветных изображений. – М.: Радио и Связь, 1981. – 216 с.
- 5.9. Корилов А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С. Корреляционные системы роботов. – Томск: Радио и Связь, Томск. отдел., 1990. – 264 с.
- 5.10. Хвощ С.Т. Варлинский Н.Н., Попов Е.А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: справочник. – Л.: Машиностроение, 1987. – 640 с.
- 5.11. Мошин В.И. и др. Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

## 6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

### 6.1. Введение

Информационные системы находят свое применение в различных сферах человеческой жизни. Информационные системы находят свое применение в радиоэлектронике, здравоохранении. 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.

### 6.2. Информационные системы микро- и минироботов

...Нападающий прорывается по правому флангу, мастерски обводит двух защитников и отправляет мяч мимо зазевавшегося вратаря в девятку. Гол! На поле кипят нешуточные страсти... однако все действие разворачивается 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 одну тысячу долларов [6.3].

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 годов прошлого века. И практически сразу, в 1992-м, был создан, пожалуй, первый широко известный двухколесный микробот Monsieur массой 1,5 г, занесенный в

книгу рекордов Гиннеса. Он умещался в 1 куб. см, 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 1990-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 годах, 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 1970-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 – «микромашин».

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 1990-х годах одной из первых запустила программу «Маленькие умные машины». Ее участники сосредоточились на задачах быстрого проектирования и производства мини- и микромашин, ориентированных 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 инфор-

мацию 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.

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 нейробиологи. Будучи загружены в мозг, молекулярные автоматы смогут следить за функционированием каждого нейрона, проанализируют все их возможные состояния 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, казалось 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 затрудняет проектирование и т. д.

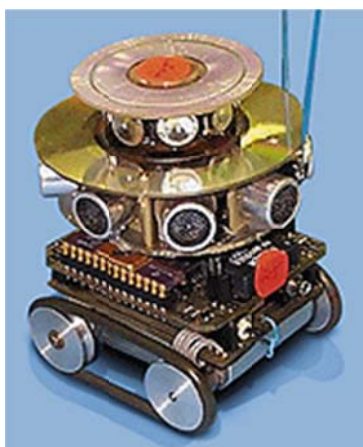


Рис. 6.1. Миниробот Millibot

– **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 пе-

риферийных 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 микромашиного 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.

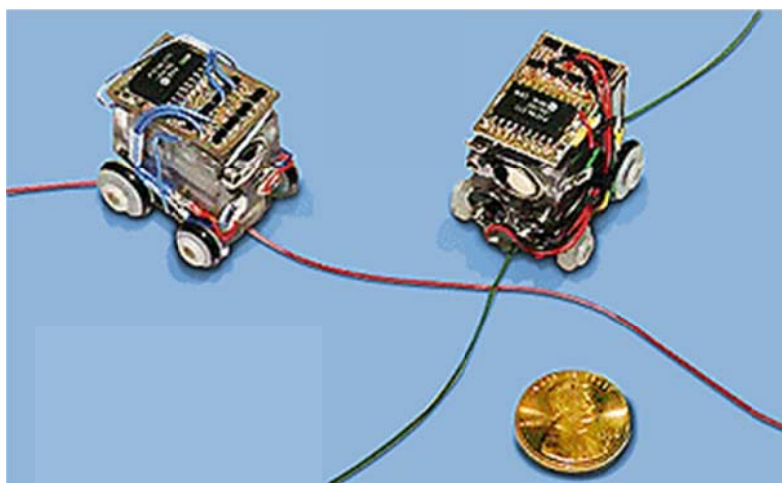
«Малыши» длиной в пару сантиметров, спроектированные Институтом проблем механики РАН, обучены перемещению по трубам диаметром 0,5 см. Они могут применяться в медицине, позволяя выполнять прямую диагностику внутренних органов человека, и даже доставлять лекарства непосредственно к больному месту. Однако 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.



*Рис. 6.2. Микроробот MARV*

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 робота 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 ресурсами. 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 пьезо-керамическую 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 микросокращение ног под воздействием электричества – порядка 200 тыс. действий в секунду на атомарном уровне. NanoWalker умеет не только прыгать-бегать (то есть все три ноги отрывая 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.

Многие из этих работ пока еще не вышли за стены научных лабораторий. Вместе с тем, как уже говорилось в этой и других статьях нашего еженедельника, 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](http://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 в начале статьи 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. Интеллектуальные медицинские оптико-телевизионные диагностические системы**

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 ме-

дицинские учреждения не достаточно 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.

**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 так же 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;

- 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.

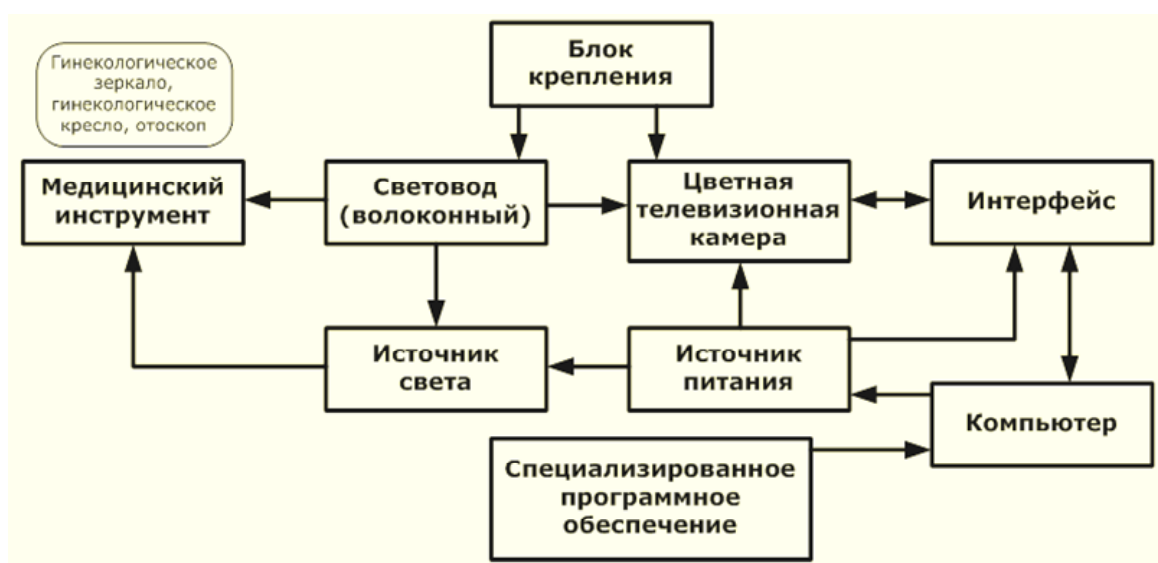


Рис. 6.3. Структурная схема ИНМТДС

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 видеокamеры 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 видеокamеры. Поскольку основную информацию о состоянии органа, которую анализирует программа, несет цвет – блики на изображении необходимо исключить из обработки.

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. 6.3, содержащий блик.



*Рис. 6.4. Профиль строки синей компоненты изображения, содержащего блик. Пик яркости, соответствующий блику отмечен стрелкой*

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:  $(p_i - p_{i-1}) \geq (p_{i-1} - p_{i-2})$ , где  $p_i$  – интенсивность  $i$ -ой 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 красной 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'Éclairage – 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:

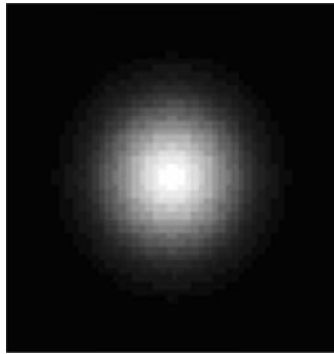
$$a_{ij}^R = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}},$$

$$a_{ij}^G = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}},$$

$$a_{ij}^B = \frac{e^{-\frac{(i-n/2)^2 - (j-n/2)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}}.$$

Ядро фильтра представляет собой гауссиан с параметром  $\sigma$ . Размер матрицы и значение параметра, используемые в программе, подобраны опытным путем. Размер матрицы  $7 \times 7$ ,  $\sigma = 1$ .

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 органов здорового и больного пациента. Ось абсцисс соответствует каналу  $a^*$ , ось ординат – каналу  $b^*$ , яркость точки характеризует частоту встречаемости соответствующего оттенка. Видно, что спектры значительно отличаются по диапазону.

Проанализировав частоту различных цветовых оттенков на изображениях здоровых органов и органов, имеющих различные отклонения авторы пришли к выводу, что они значительно отличаются.



*Рис. 6.6. Частота цветовых оттенков ( $La^*b^*$ ) изображения здорового органа (шейки матки) – а; имеющего отклонения – б*

На основании проведенного анализа нескольких изображений внутренних органов здоровых пациентов, полученных с помощью МОТДС была выделена область спектра, в которую укладываются спек-

тры 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 рис. 6.8.



*a*



*b*

*Рис. 6.7. Варианты ИНМТДС для гинекологических исследований:  
a – гибкий манипулятор, b – трехзвенный манипулятор*

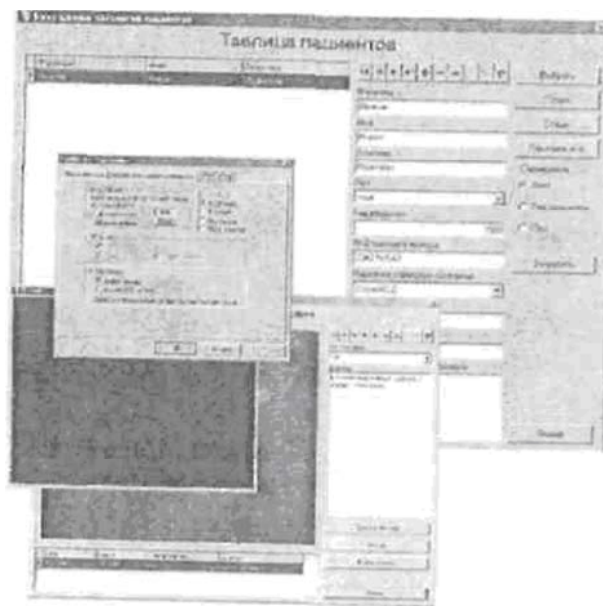


*a*



*b*

*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. 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 скорости реакций. К этому надо добавить большую физическую нагрузку, так как нередко операции продолжаются по несколько часов. Обычно хирург работает стоя, наклоняясь 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 опе-

ративного 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 (radial keratotomy), при которой глубина надреза оболочки глаза не должна превышать 20 мкм, в то время как даже опытный хирург может превысить 100 мкм. В Канаде разработан для выполнения этой операции специальный робототехнический комплекс, обеспечивающий нужную точность. Другой областью, где также требуется высокая точность, является микронефрохирургия. 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.

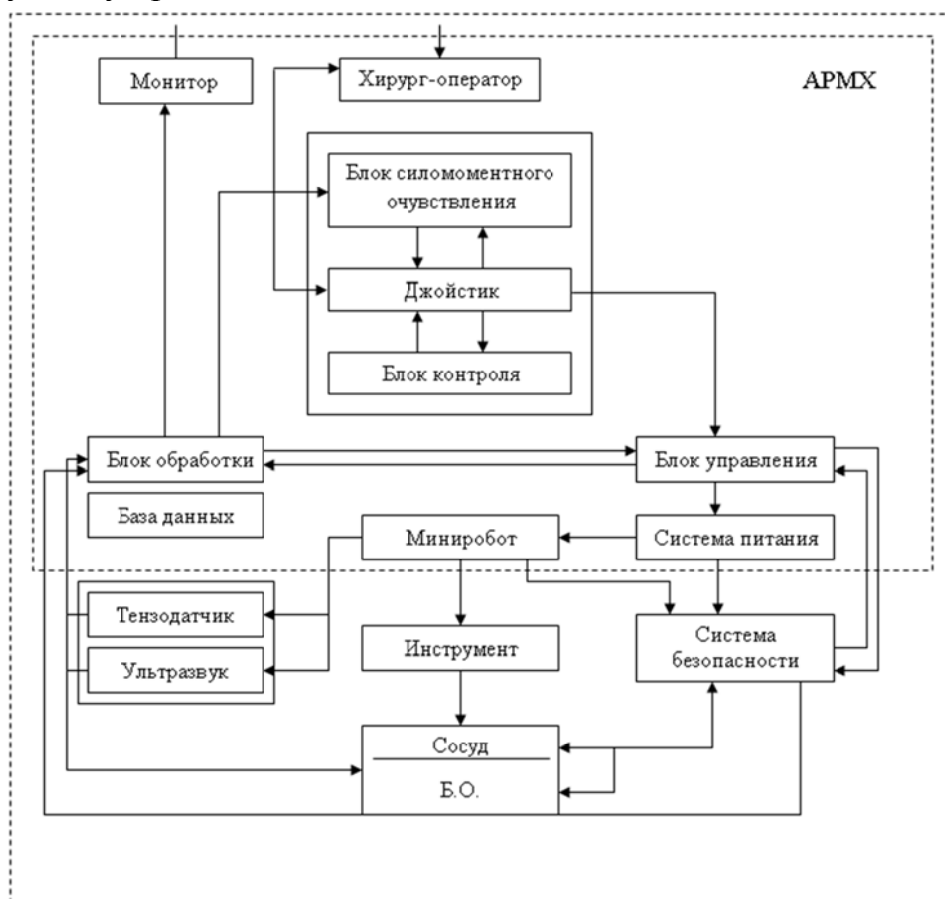
#### *6.3.2.1. Состав миниробота, для диагностики и хирургии сосудов*

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 ис-

пользовании 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 миниробот, предназначенный для автономного передвижения внутри крупных кровеносных сосудов, который способен самостоятельно доставить рабочий или диагностический инструмент к пораженному участку, перемещаясь внутри сосуда. Миниробот представляет собой трехзвенное устройство, оснащенное диагностическими и воздействующими элементами. Движение миниробота 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 минироботу перемещаться внутри сосуда, принимая его форму и при этом не препятствуя току крови.



*Рис. 6.10. Структурно-функциональная схема миниробототехнической система*

Структурно-функциональная схема РТС, включающей описываемый миниробот, приведена на рис. 6.12. Управление минироботом 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 минироботом. 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 миниробот. Подача физиологического раствора в звенья осуществляется через катетер, присоединенный к гидроприводной системе. Миниробот имеет собственные температурные и силовые сенсоры, что создает предпосылки для облегчения работы хирурга. Силомоментное очувствление необходимо для получения тактильной информации о сопротивлении движению миниробота 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 минироботе, 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 миниробота в канале сосуда, выдавая визуальную информацию на монитор для хирурга-оператора. В случае

возникновения экстренной ситуации система безопасности автоматически отключает систему питания миниробота.

### *6.3.2.2. Деятельность хирурга-оператора миниробота*

Для того чтобы сформулировать эргономические требования к рассматриваемой робототехнической системе, необходимо вначале определить, какие задачи и каким образом решает с помощью миниробота 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. Заметим, 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 информационной системе миниробота, 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 минироботом. 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 минироботом на этой стадии также должен быть предусмотрен. Заметим, что здесь особо важную роль играет наличие системы отображения усилий, придающей естественность рабочим движениям хирурга и, вместе с тем, позволяющей регулировать ручную 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 реакции по зрительному каналу, что немаловажно с позиций безопасности для пациента. С другой стороны, этот режим наиболее сложен для хирурга-оператора миниробота, 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 миниробота 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 миниробота. 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 миниробота.

Обобщая сказанное, можно определить основные задачи хирурга-оператора медицинской миниробота. 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. Заметим, что для решения последней задачи рабочие движения миниробота 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.

#### *6.3.2.3. Эргономические требования к хирургическому миниробота*

Работа хирурга-оператора медицинского миниробота представляет собой сложную форму предметной деятельности человека, опосредованной технической системой. Поэтому, прежде всего, при эргономическом проектировании миниробота 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 минироботам, в свою очередь, можно разделить на три группы – требования к системе представления информации оператору, к органам управления и требования к системе управления роботом, обеспечивающие эффективное управление со стороны оператора.

Особенностью медицинского миниробота является тот факт, что рабочей средой робота является организм пациента. Это накладывает чрезвычайно жесткие требования, предъявляемые к минироботу 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 к общей безопасности системы относятся преимущественно требования технического характера: стабильное давление питания, возможность определения местоположения микроробота с помощью внешних диагностических устройств. Следует отметить необходимость многократной стерилизации оборудования и контроль 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 миниробота 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 робо-

тотехнической 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 миниробота 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 минироботом и наоборот.

Деятельность хирурга, использующего миниробота, 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 минироботом. Во-вторых, миниробот 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) очувствления, 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 минироботом 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, которыми пользуется 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.

#### *6.3.2.4. Информационные системы медицинских нанороботов*

В Монреальском университете впервые в истории создан медицинский робот, способный путешествовать по кровеносным сосудам живых существ. Собранная 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 восполнить 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 имплантантов (некоторые из них уже используются в стоматологических клиниках для особенно сложных случаев протезирования). Вто-

рые – для создания медицинских инструментов, упаковки и т. п. У любой ткани есть собственный рельеф и собственная химическая активность: при использовании обычных имплантантов 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 помощи 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 я уверен, что лет через 10...20 устройства, о которых я говорил, станут вполне будничной реальностью.

#### **6.4. Мехатронная система для манипуляций на мягких тканях**

В медицине существует множество процедур, связанных с пространственными 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 роботы могут входить в состав мехатронных систем. Именно об этих системах будет идти речь далее [6.19].

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 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 расслаблен или вызывать волевое напряжение.

Цель манипуляций на мягких тканях состоит в изменении состояния пациента, для здоровых людей – гармонизация, для больных – терапия.

Впервые идея управления аппаратными средствами массажа с использованием робота была предложена на втором симпозиуме по медицинской робототехнике в Гейдельберге в 1997 г. [6.19]. 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 неумолимость.

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 справиться 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 не полностью 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. 6.11 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.

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, так же как 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, не полностью определены необходимые эффективные значения биомедицинских параметров, так же как связь их с параметрами механического воздействия.

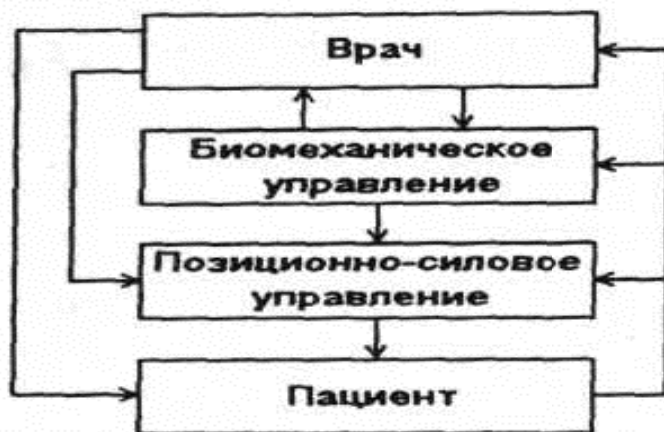


Рис. 6.11. Трехуровневая структура управления мехатронной системой для мануальной терапии и массажа

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 нечеткая логика, а модель системы представляться как нейронечеткая. Однако в данной статье 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. 6.12).

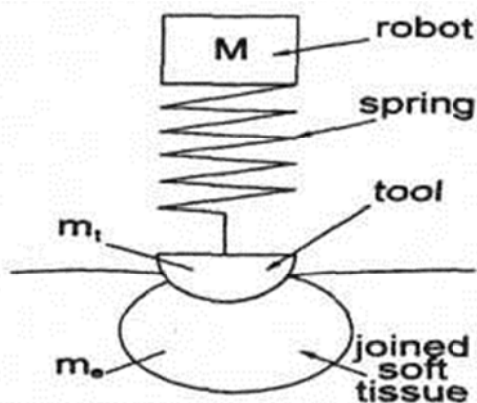


Рис. 6.12. Одноприводной системы с тремя массами

Для четырех элементов этой системы дифференциальные уравнения имеют вид:

$$M(\ddot{q} - \ddot{\Delta}_s) = F_d + Mg - T;$$

$$T = \Delta_s k_s$$

$$m_t \ddot{q} = m_t g - F - T$$

$$m_e \ddot{q} = F + m_e g - \mu \dot{q} - k_e \Delta_e$$

где  $q$  – смещение инструмента;  $\Delta_s$  – деформация пружины;  $\Delta_e$  – 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. 6.13.

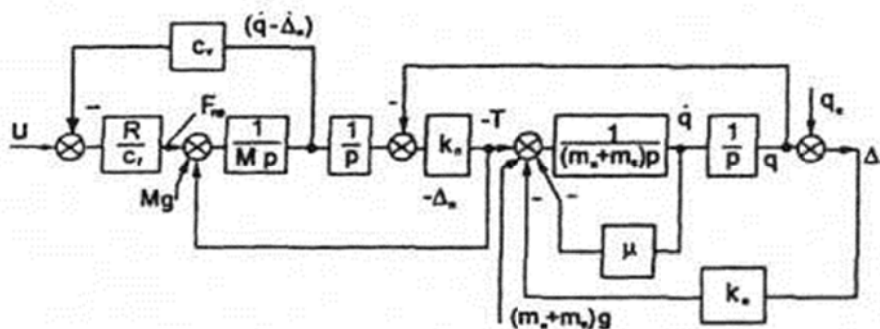


Рис. 6.13. Открытая архитектура контроллера мехатронной системы

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.

Препятствием к реализации большинства существующих «ручных» медицинских процедур явились следующие ограничения штатной системы управления «Сфера-36»:

- недостаточное быстродействие центрального процессора;
- малый объем оперативной памяти;
- ограниченные возможности ввода/вывода цифровой и аналоговой информации;
- язык программирования ARPS не позволяет реализовать алгоритмы позиционно-силового управления в режиме реального времени. Архитектура системы управления «Сфера-36» не позволяет справиться с указанными проблемами.

На сегодняшний день существует ряд аппаратных и программных средств, совместимых с персональным компьютером типа IBM PC, которые решают задачи развития мехатронной системы. Такими модулями являются:

- интерфейсы для ввода аналоговой биомедицинской информации (например, плата сбора аналоговой и цифровой информации ЛА-70);
- комплекс для оценки состояния пациента;
- система технического зрения для согласования системы координат робота и пациента;
- графический интерфейс для моделирования выполняемых процедур.

Другие программные модули, необходимые для реализации вышеприведенных алгоритмов кинематического и динамического управления, а также алгоритмов биомеханического управления с биологической обратной связью, необходимо создавать и совершенствовать.

Возможности подключения модулей и их модернизации, возможности подключения к внешней сетевой коммуникационной среде, развития системы в условиях максимальной независимости от изменений системной платформы – все это дает открытая архитектура системы управления.

Хотя система управления «Сфера-36» позволяет подключение внешней ЭВМ (персонального компьютера) через интерфейс RS-232 (со скоростью передачи информации не более 9600 бит в секунду), однако это позволяет лишь повысить сервис при подготовке и хранении больших управляющих программ, но не позволяет реализовать алгоритмы управления приводами робота.

Следующим шагом, расширяющим возможности системы управления роботом, было использование разработок фирм «Intelligent Control group at ISR» и «Advantech». В этих разработках процессоры верхнего и приводного уровней штатной системы управления удаляются и заменяются платой TRC004 или PCL-832, вставляемой в слот компьютера. Платы позволяют передачу цифровых команд, прямое чтение шести суставных инкодеров, чтение через аналого-цифровой преобразователь шести потенциометров для калибровки, управление суставными двигателями через цифроаналоговые преобразователи. Необходимые для управления команды входят в состав прилагаемых библиотек.

### ***Безопасность и эффективность 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 аб-

сурдным требованием. Поэтому существующие запреты вызваны инерцией мышления, в частности, представлением о медицинском роботе как о 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 отсутствии 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 прекрасными, 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 релаксации, 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, немедикоментозными, 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.

Для здоровых людей – это гармонизация, коррекция отклонений, снятие усталости. К этой группе относятся люди малоподвижные, ленивые к физкультуре и спорту, несимметрично нагружаемые, подверженные стрессам, утомляемые физической или умственной работой, пожи-

лые люди. К этой же группе относятся спортсмены и космонавты, пользователи вычислительной техники, шоферы дальних перевозок, администрация, участники заседаний, студенты на многочасовых лекциях. Реабилитационные воздействия необходимы в случаях продолжительных стрессовых нагрузок, когда механизмы саморегуляции функциональных систем гомеостатического уровня оказываются недостаточными для сохранения показателей внутренней среды в норме.

Другой вопрос – пользуется ли процедурами мануальной терапии и массажа каждый человек в достаточной степени? На сегодняшний день основным препятствием к доступности является ограниченная мышечная энергетика «ручников». Предлагаемые ручные процедуры являются энергоемкими, а потому дорогостоящими, т. е. являются достоянием привилегированных. В спорте, например, это элита уровня олимпийской команды; если говорить о санаториях и курортах, то это эпизодические сеансы. В клиниках, домах престарелых это сильно заниженные нормы процедур.

Чтобы преодолеть «энергетический кризис» в данной проблеме, проектируются разнообразные аппаратные средства, но наиболее универсальным решением должна быть робототехника, и наиболее эффективное решение сегодняшнего дня – мехатронная медицинская система. Именно мехатронная система, обладающая источником механической энергии и развитой компьютерной системой управления, позволит обеспечить наибольший сервис, безопасность, универсальность.

Если стоимость электроники и программного обеспечения системы соизмерима со стоимостью персонального компьютера, и с развитием новых информационных и электронных технологий существует тенденция к снижению стоимости, то наиболее инерционной в смысле снижения стоимости является механика системы. Однако следует иметь в виду, что для манипулятора робота, работающего на мягких тканях, необходимы свойства, противоположные свойствам жесткости и прецизионности дорогостоящих промышленных роботов. Это внушает оптимизм в проектировании мехатронных медицинских систем, эффективных не только технически, но и экономически. Такие системы могут стать предметами индивидуального и семейного пользования, а также устанавливаться в клиниках, госпиталях, профилактических, реабилитационных, спортивных центрах, фитнес салонах, курортах.

С учетом наличия в разрабатываемой медицинской системе, выполняющей процедуры мануальной терапии и массажа, трех взаимосвязанных компонентов (механики взаимодействия робота с пациентом, электронной и электромеханической системы приводов и компьютерного управления) оправданным является проектирование системы как мехатронной.

Современная медицинская система для выполнения манипуляций на мягких тканях должна проектироваться как иерархическая с тремя уровнями управления, включая биомеханическое и позиционно-силовое управление.

Для разработки позиционно-силового управления необходимым является представление мягкой ткани, с которой взаимодействует робот, моделью нестационарной, инерционной, упруго-вязкой среды.

Для разработки позиционно-силового управления могут быть использованы известные и предложенные в статье структуры и законы управления, в том числе кинематического, динамического и адаптивного по коррекции ориентации инструментальной оси.

Чтобы обеспечить развитие данной мехатронной системы и ее конкурентоспособность, предлагается открытая архитектура контроллера системы управления.

Для снижения стоимости самой дорогостоящей приводной части системы для медицинских роботов предлагается использовать податливость и грубость приводов как свойства, несовместимые с известными прецизионными жесткими роботами.

## **6.5. Диагностика материалов оптико-телевизионными информационными методами**

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 [6.13].

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 измерители 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, двумерная, трехмерная).

При исследовании различных материалов выделяют характерные признаки в области деформации (табл. 6.1).

Таблица 6.1.

*Признаки в области деформации*

№ п/п	Тип материала	Характерный элемент мезосуб структуры	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.	Сдвигонеустойчивый Поликристалл (растяжение)	а) мартенситные Ламели б) поперечная мартенситная полоса	а) длина, период, ориентация б) 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



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.

### 6.5.1. Оптико-телевизионная система для диагностики материалов

Для получения изображений поверхности исследуемого материала используется оптико-телевизионная измерительная система (ОТИС). [6.9]

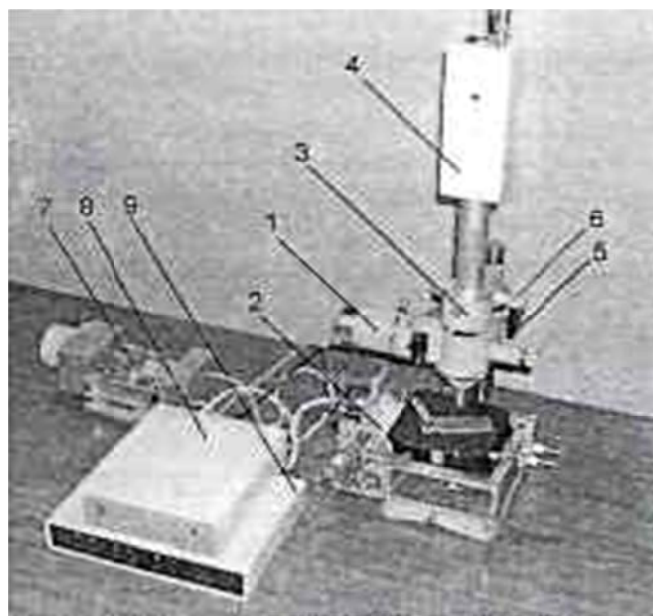


Рис. 6.14. Оптико-телевизионная измерительная система

Основные конструктивные блоки: 1 – устройством 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 включает 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, 2 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.

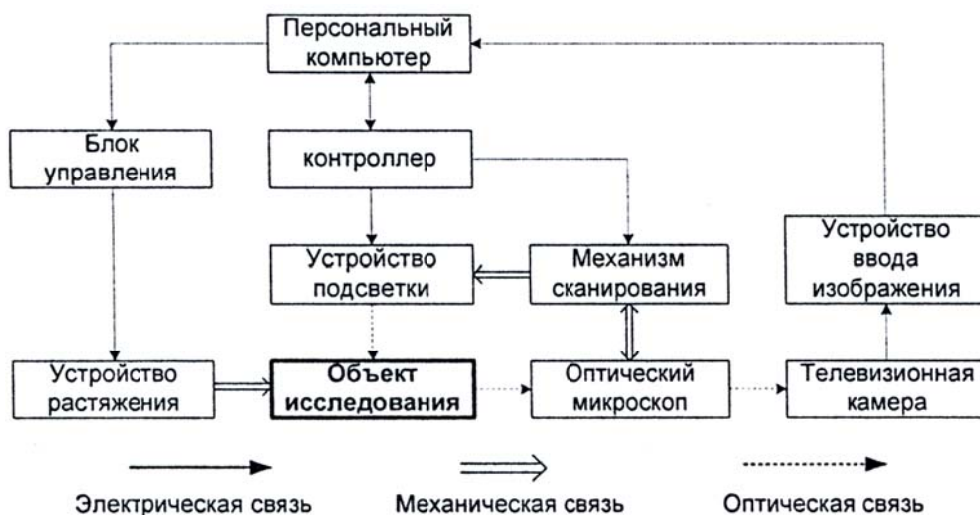


Рис. 6.15. Обобщенная структурная схема ОТИС приведена

Элементы структурной схемы выполняют следующие функции:

Технические характеристики ОТИС:

Определяемые параметры деформации материала: Распознавание (нахождение) области деформации; Размер деформируемой области (площадь, периметр, длина, ширина); Величину смещения деформируемой области и ее элементарных площадок; Структурные (рисунок, цвет) признаки деформируемой области.

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.

Вес установки 7 кг.

Габариты 300·300·500 мм.

Питание 220В 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 предварительно обработки изображения реализованы в отдельном программном продукте (рис. 6.15). Основной целью предварительной обработки является удаление шумов, улучшение контрастности и т. д.

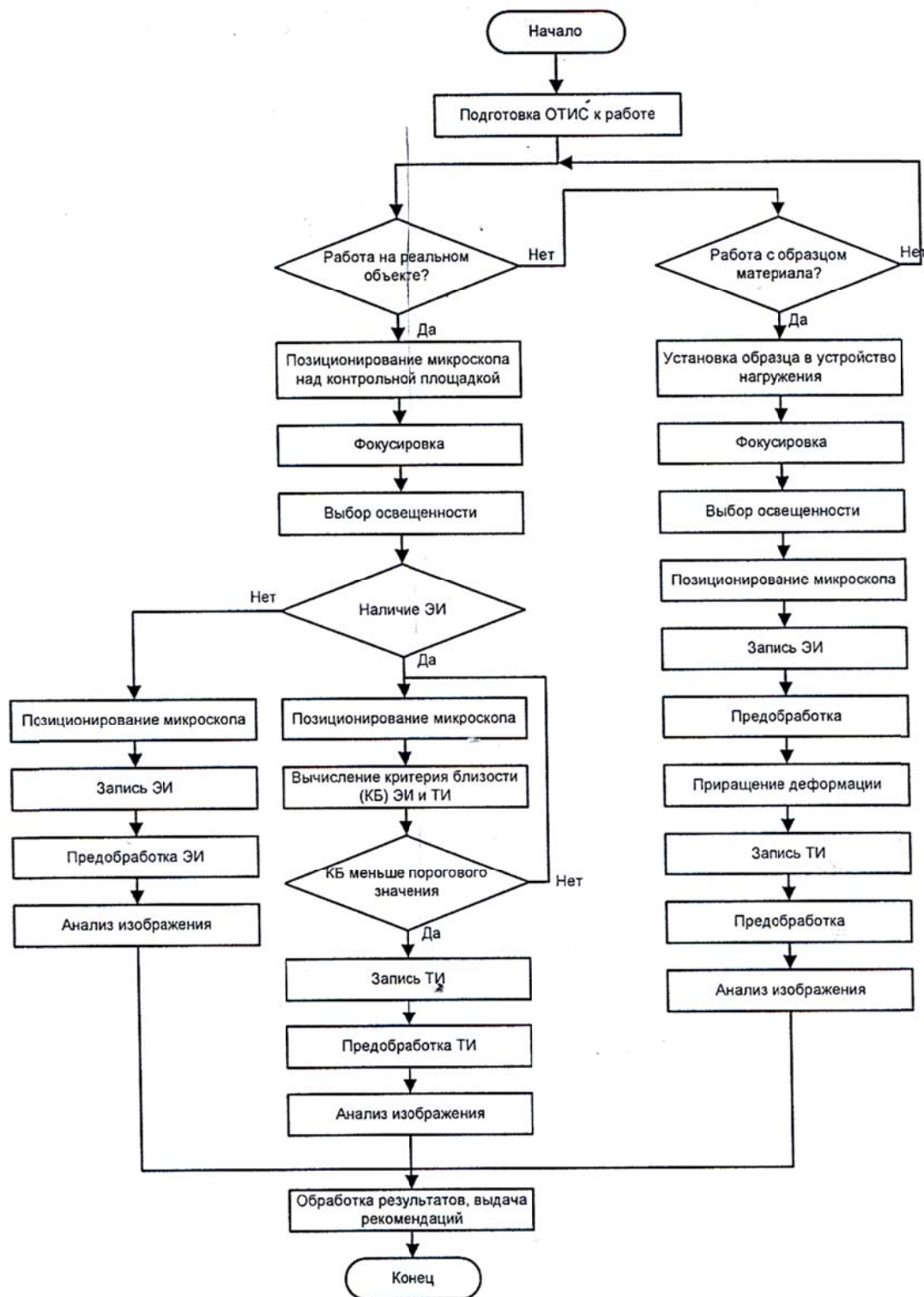


Рис. 6.16. Схема программного обеспечения ОТИС

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.

$$g(x, y) = \frac{1}{P_{(n,m) \in S}} \sum f(n, m). \quad (6.1.)$$

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. 6.17. Слева на рис. 6.17 показано исходное изображение, полученное с помощью ОТИС.

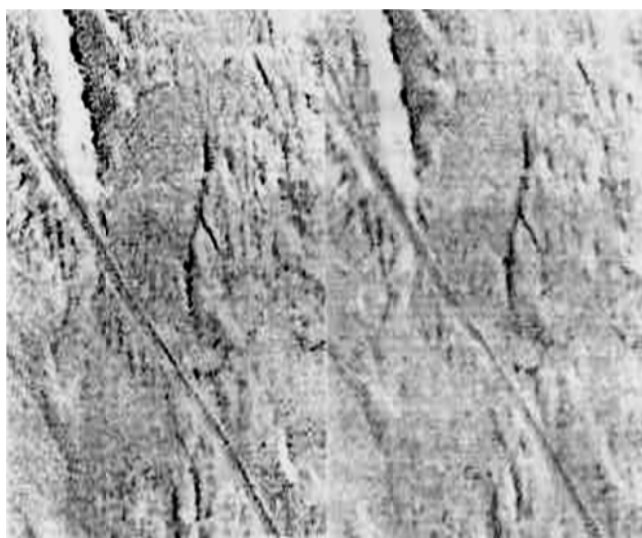
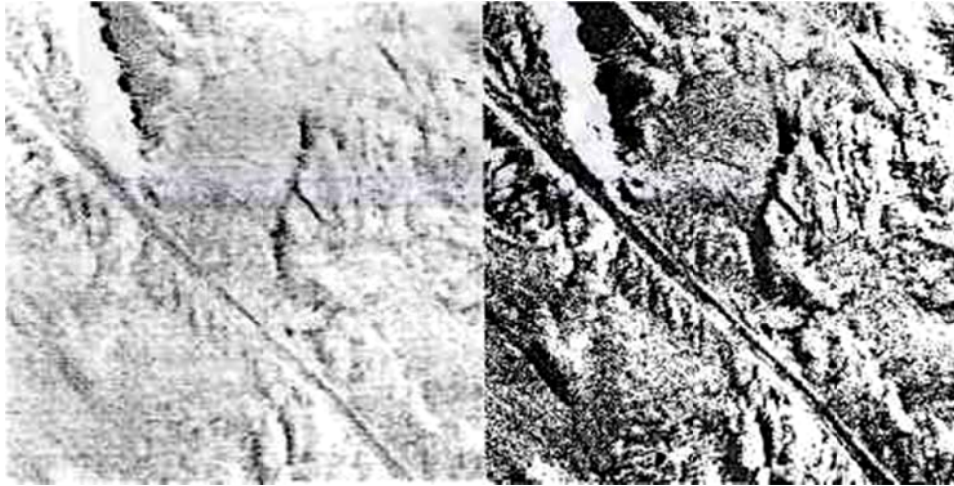


Рис. 6.17. Результат сглаживания изображения



*Рис. 6.18. Результат бинаризации с локальным порогом исходного и сглаженного изображений стали*

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. 6.18).

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.

Подобный подход позволяет определять степень деформации с помощью численной характеристики, получаемой на основе анализа субструктуры, наблюдаемой на поверхности материала под нагрузкой.

### **6.5.2. 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 [6.1].

Для каждого промежутка наблюдений определяется среднее значение интенсивности по формуле:

$$\psi_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \psi(t); \quad (6.2)$$

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \psi(u) - \psi_{\tau} \}, \quad (6.3)$$

где  $t$  – количество учитываемых отрезков в промежутке,  $\psi_{\tau}$  – средняя яркость в рассматриваемом отрезке. Затем вычисляем накопившееся отклонение яркости от средней  $\psi_{\tau}$ : 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:

$$S = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\psi(t) - \psi_{\tau})^2 \right)^{1/2}; \quad (6.5)$$

$$R/S = (r/2)^H, \quad D = 2 - H. \quad (6.6)$$

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:

$$y = a + bx, \quad \text{где } b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i - N \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (6.7)$$

$$a = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right).$$

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 двухмерное изображение заменяется набором некоторых временных рядов с последующим их усреднением.

### 6.5.3. 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.

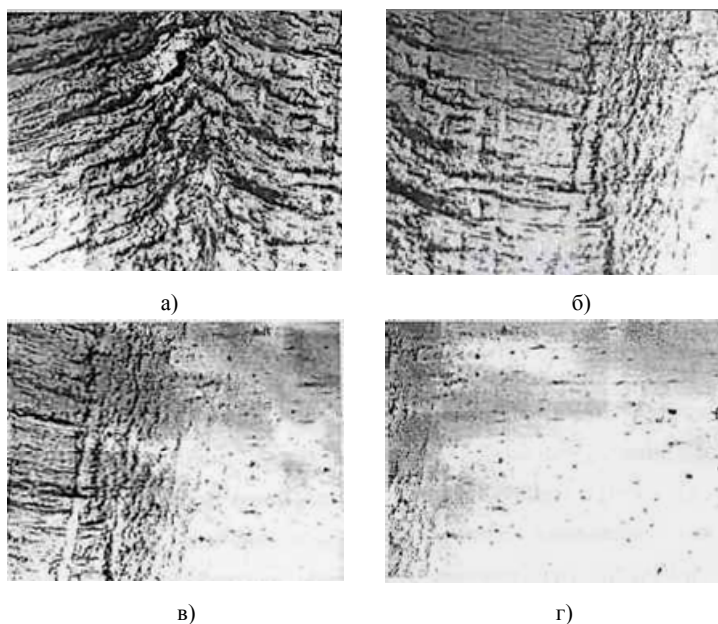
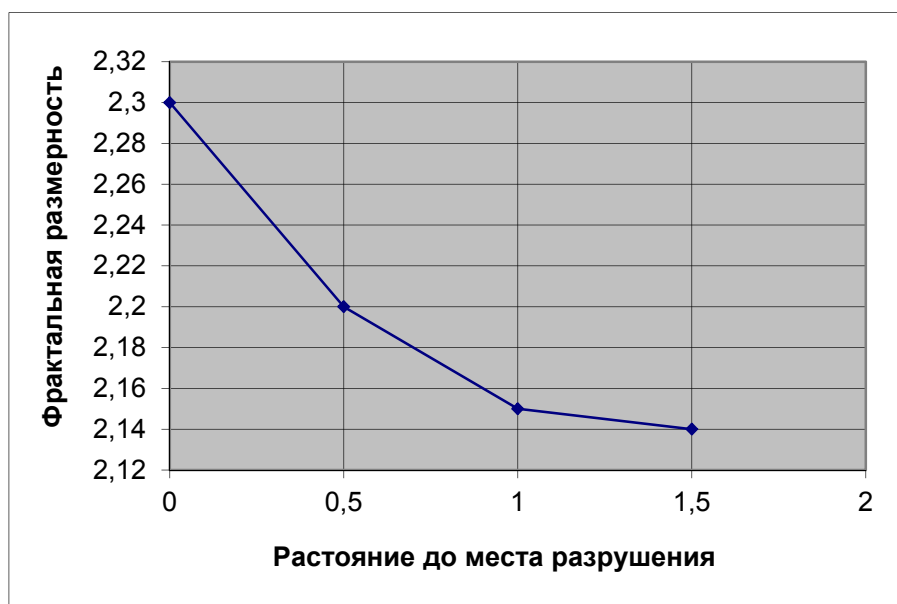


Рис. 6.19. Область разлома на разном расстоянии от места разрушения:  
а) 0 мм, б) 0,5 мм, в) 1 мм, г) 1,5 мм

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  $\delta$  в логарифмическом масштабе. Затем на графике выбирается участок, отстоящий на 15 % от максимального и минималь-

ного значения этой функции и производится аппроксимация данного участка методом наименьших квадратов [6.5]. На рис. 6.19 показана серия снимков области разлома материала.



*Рис. 6.20. Результат измерения фрактальной размерности по полученным изображениям*

Используя приведенные алгоритмы можно вычислить значение фрактальной размерности для данных изображений (рис. 6.20).

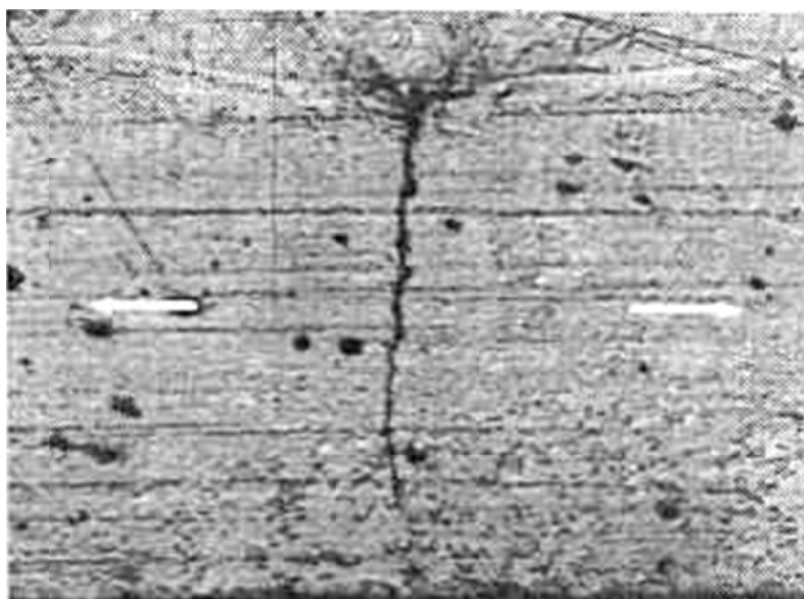
#### **6.5.4. Корреляционные статистические алгоритмы**

При помощи светового металлографического микроскопа снимаются эталонное изображение (ЭЙ) исследуемого участка поверхности образца (до приращения деформации) и текущее изображение (ТИ) этого же участка (после приращения деформации). ТИ и ЭЙ разбиваются одинаково на равное число фрагментов (элементарных квадратных площадок). Каждый фрагмент ЭЙ сравнивается с соответствующим фрагментом ТИ и определяется смещение фрагмента ТИ относительно фрагмента ЭЙ. Выделим три основных алгоритма сравнения: модифицированный корреляционный, разностный и разностный быстрый.

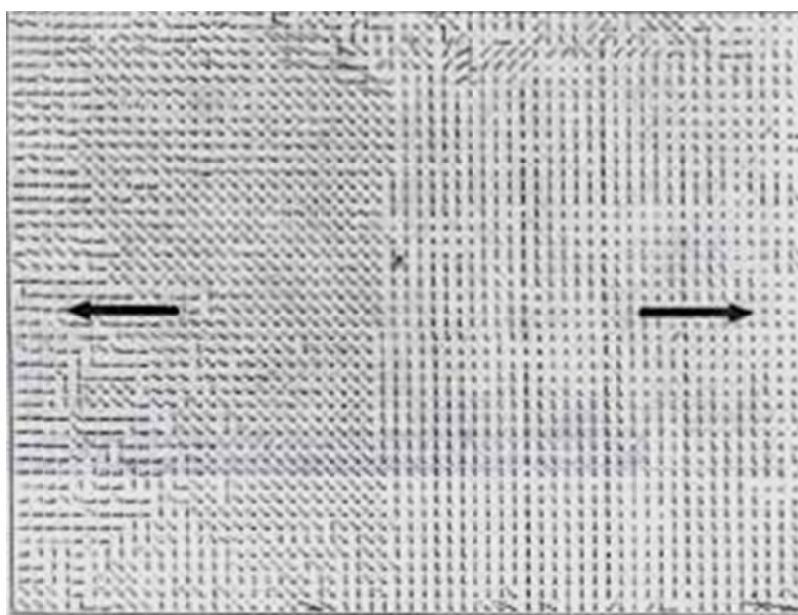
Анализируя серию таких изображений, снятых в процессе разрушения материала при проведении эксперимента, по длине и направлению векторов можно просмотреть динамику процессов разрушения и движение пластов поверхности (мезосубструктур). При анализе файлов изображений можно уменьшить зависимость от этих факторов путем подбора размера элементарных площадок. Рассмотрим процесс исследования образца под нагрузкой (рис. 6.21).



На рис. 6.22 показан результат работы программы при размерах площадки 16 (а) и 24(б) пикселей.



*Рис. 6.21. Изображение поверхности деформируемого материала*



*Рис. 6.22. Карты векторов смещения  
при различных размерах элементарной площадки*

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 изображе-

ния снизу вверх, и затем в стороны под углом  $90^\circ\text{C}$ . На исходном изображении (рис. 6.21) в этих местах видны деформации в виде темных областей.

Данный программный комплекс предназначен для исследования неорганических объектов. Методы, описанные в статье применимы для исследования как неорганических, так и органических структур. Исследование органических структур обуславливает необходимость в использовании для анализа цветных изображений, т. е. дополнительно изучение цветовой информации об объекте исследования.

Авторами разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее 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 видео камерой. Блики на изображении исключить из обработки для достоверности получаемых результатов. Проанализировав частоту различных цветовых оттенков на изображениях здоровых органов и органов, имеющих различные отклонения, авторы пришли к выводу, 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.

## 6.6. Варианты реализации систем технического зрения

### 6.6.1. Светолокационные системы технического зрения

Одной из центральных задач при составлении описания внешней среды являются распознавание и определение пространственного расположения окружающих предметов. В качестве исходной информации используются оптические изображения предметов и расстояний до точек их поверхности, определяемых различными способами. Системы технического зрения, предназначенные для решения таких задач, строятся по классической стереоскопической схеме, либо используется двумерный аккумулятор изображений в сочетании с дальномерным устройством.

Методы определения формы объектов и параметров движения робота по последовательности изображений можно разделить на две большие группы: 1) методы, основанные на установлении соответствия между отдельными изображениями последовательности, 2) методы, основанные на анализе поля оптического потока (поля локальных скоростей на динамическом изображении).

В методах первой группы прослеживаются такие особенности изображения, как углы и линии, и на основе этой информации с помощью триангуляции определяется трехмерная структура поверхности сцены. В методах второй группы изображение рассматривается как функция трех аргументов – двух пространственных координат и времени. В предположении, что изменения изображения за время между последовательными циклами ввода видеоинформации малы, искомая форма определяется через дифференциальные изменения этой трехмерной функции.

Структура системы включает блоки, стереосогласования двух камер, определения движения, оценки движения, модификации положения, старой и новой моделей. Основными данными являются набор пространственных точек  $P_j$  – в системе координат робота, называемый локальной моделью, и оценка текущего положения робота в некоторой фиксированной глобальной системе координат. Точки локальной модели получают путем стереосогласования и используются в качестве ориентиров. После цифровки новой стереопары изображений точки локальной модели сопоставляются с новыми изображениями с целью определения их текущего положения по отношению к роботу. В блоке определения движения производится оценка поворота и смещения ( $R$  и  $T$ ), связывающего новые и старые координаты. В блоке модификации модели производятся преобразование старой локальной модели в текущую систему координат и включение в нее новой информации, связанной с вновь выделенными точками. На заключительном этапе оценка

движения используется для модификации глобального положения робота. Затем цикл повторяется с новой парой изображений.

Рассмотрим СТЗ дальномерного типа. В состав локационного дальномера (ЛД) входят измеритель расстояний (ИР), состоящий из источника излучения и приемника отраженного сигнала, и сканирующее устройство (СУ), управляющее лучом и измеряющее его положение в пространстве (рис. 6.22). С помощью излучателя и оптической системы (призм, линз и зеркал) производится облучение наблюдаемой поверхности сигналами оптического диапазона в угловом секторе, составляющем зону обзора локатора. Прямой и отраженный сигналы поступают через приемное устройство в измерительный блок, где по разности их фаз для каждого положения луча определяется расстояние до соответствующей точки поверхности. Угловые координаты луча формируются на сигналах от блока управления, который также синхронизирует излучатель и сканирующее устройство. Координаты дальности и двух углов, определяющих положение луча в пространстве, поступают в ЭВМ для последующей обработки.

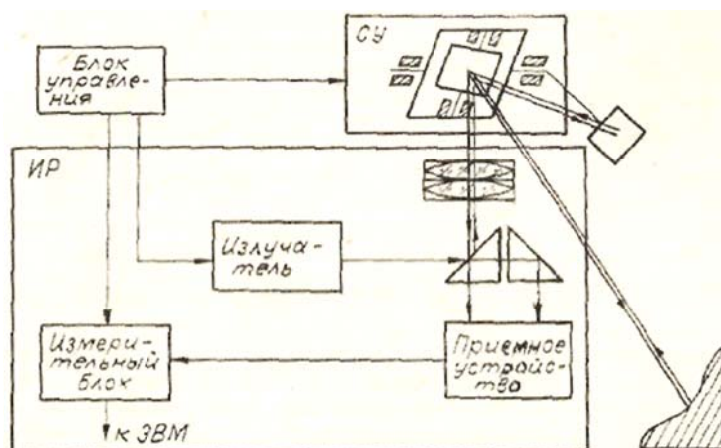


Рис. 6.23. Структурная схема получения информации в локационном оптическом дальномере

Для СТЗ, строящейся на основе локационного дальномера, характерны следующие достоинства: а) высокая разрешающая способность и точность измерения координат точек поверхности, б) широкий диапазон углов обзора, в) достаточно большая дальность действия, г) устойчивость к фоновой помехе, д) наличие экспериментального опыта и элементной базы для изготовления устройства. Наряду с перечисленными достоинствами необходимо отметить следующие недостатки ЛД: 1) зависимость точности измерения дальности от отражающих свойств поверхности; 2) недостаточное быстродействие и низкая надежность электромеханического сканирующего устройства; 3) наличие помехи,

отраженной от защитного стекла, при соосной конструкции оптических трактов излучателя и приемника.

Система технического зрения со сканирующим подсветом (СТЗ СП) состоит из приемного устройства, включающего две ТВ-камеры (ТВК<sub>1</sub>, ТВК<sub>2</sub>) на матрицах с зарядовой связью (ПЗС-матрицах и электронный измерительный блок, источника подсвета, генерирующего один или несколько лучей, и сканирующего устройства в виде поворачиваемого с помощью шагового двигателя объектива или зеркала (рис. 6.24). ТВ-камеры в такой системе образуют стереопару. Электронный измерительный блок служит для вычисления и передачи в ЭВМ экранных координат точек облучаемой поверхности; подсвет осуществляется импульсными сигналами длительностью порядка  $10^{-3}$  с.

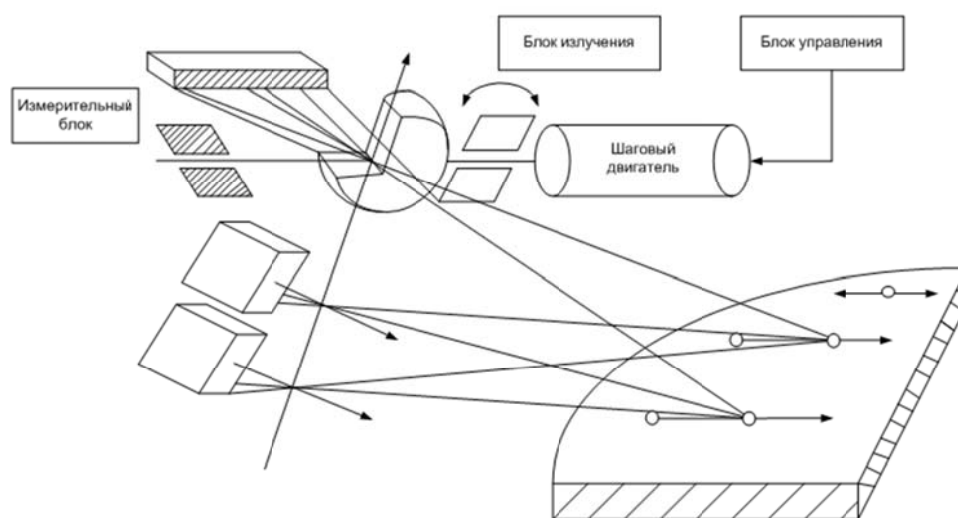


Рис. 6.24. Схема получения информации в системе со сканирующим подсветом

Принцип действия СТЗ СП состоит в следующем. С помощью излучателя и оптической системы, центр которой находится на базисной прямой  $O_1O_2$ , на наблюдаемой поверхности высвечивается совокупность точек, расположенных в одной и той же плоскости. Указанные точки наблюдаются телевизионными камерами, причем в каждой базисной плоскости расположены стереоизображения лишь одной подсвечиваемой точки наблюдаемой поверхности, что снимает проблему идентификации точек на стереопарных изображениях. Очередная совокупность точек, высвечиваемых на поверхности, и их стереоизображения формируются поворотом излучателя и оптической системы (с помощью шагового двигателя). Вычисления координат наблюдаемых точек производится в измерительном блоке по известным фотограммет-

рическим соотношениям. Измеренные координаты передаются в ЭВМ для последующей обработки.

При использовании последовательности из 16...20 лучей подсвета сканирование осуществляется по углу места; в этом случае базис стереосистемы располагается вертикально к поверхности. Ввод видеоинформации происходит с быстроедействием 16...20 точек за один кадр телевизионной развертки. Мощность излучателя порядка 20...40 мВт, частота повторения 25 Гц. При этом площадь высвечиваемого пятна составляет 10...15 см<sup>2</sup>.

Достоинствами базисной системы со сканирующим подсветом являются: а) достаточно хорошие энергетические и массогабаритные характеристики, б) простота электронного измерительного устройства, в) возможность использования типовых телевизионных ПЗС-матриц в приемном устройстве.

Недостатками системы являются: 1) ограничения по плотности измеряемых точек на поверхности, 2) недостаточно высокое быстроедействие и низкая надежность электромеханического сканирования, 3) необходимость изготовления специальных объективов для приемного устройства со встроенными узкополосными фильтрами. В состав СТЗ с одновременным подсветом (СТЗ ОП) входит излучатель матричного типа, приемное устройство на ПЗС-матрице со строчной структурой и электронный измерительный блок. Система аналогична СТЗСП, но в ней измеряемые точки высвечиваются и отображаются одновременно. Матричный излучатель формирует пучок узконаправленных лучей с заданными пространственными координатами. Электронный измеритель служит для вычисления экранных координат высвеченных точек поверхности и передачи их в ЭВМ для последующих преобразований. Подсвет производится короткими импульсами ( $10^{-8} \dots 10^{-7}$  с) с большой плотностью мощности ( $10^7 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и малой частотой повторения (0,5...1,0 Гц). Число измеряемых точек соответствует числу строк приемного устройства, что упрощает вычисление по ним координат дальности.

Достоинствами базисной системы с одновременным подсветом являются: а) высокая точность измерения координат точек поверхности, б) высокое быстроедействие СТЗ, обеспечивающее отсутствие дополнительных погрешностей измерения за счет движения аппарата, в) повышенная надежность благодаря отсутствию механических подвесных узлов, г) простота электронного измерительного устройства.

Наиболее полную информацию о геометрических свойствах поверхности объектов позволяют получить стереотелевизионные СТЗ, оснащенные одной или несколькими ТВ-камерами, работающие при естественном освещении.

Так, стереопарная система с вертикальным базисом формирует модель внешней среды в результате обработки двух телевизионных изображений, получаемых одновременно (с помощью двух ТВ-камер) и образующих стереопару. В результате анализа и попарного отождествления соответственных участков стереопарных изображений можно определить вертикальные профили (разрезы) наблюдаемой поверхности и построить ее матричную модель.

Известные методы поточечного отождествления участков стереопарных изображений, основанные на корреляционных методах, часто оказываются неработоспособными из-за разрывов видимой поверхности и больших вариаций пара-лаксов соответственных точек на изображениях. Более эффективным является метод отождествления фрагментов, содержащих перепады интенсивности, представленные на изображениях контурами. Обработка полученной стереопары производится в пределах соответственных полос, ограниченных линиями сечений двух базисных плоскостей  $P_1$  и  $P_2$  с плоскостями изображений (рис. 6.25).

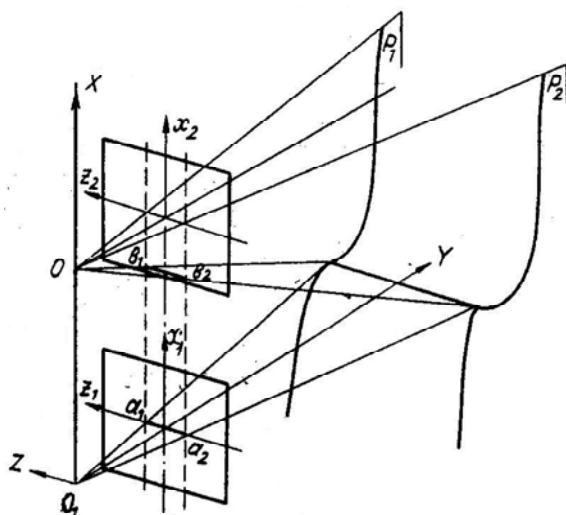


Рис. 6.25. Схема получения стереопары с вертикальным базисом

В целях сокращения времени на обработку задача нахождения параметров контура решается в два этапа. На первом – в результате сканирования изображений в узких полосах (шириной в 2...3 элемента) производятся обнаружение перепадов интенсивности и определение местоположений контуров с помощью вычисления свертки фрагмента сканирования с разностной маской. На втором – в точках, где перепад превышает заданный порог, производится вычисление параметров контуров, проходящих через эти точки, – наклонов и усредненных значений интенсивности по обе стороны контура. Кроме указанных можно ввести дополнительные параметры. В общем случае каждый контур описыва-

ется вектором параметров, а списки таких описаний контуров  $S_1$  и  $S_2$ , получаемые на соответствующих полосах нижнего и верхнего изображений стереопары, имеют различное количество векторов.

Разработан рекурсивный алгоритм идентификации векторов в списках  $S^1$  и  $S^2$  с использованием процедуры динамического программирования. Для средних точек идентифицированных контуров вычисляются параллаксы и координаты проектируемых в них точек снимаемой поверхности. В целях повышения надежности отождествления учитываются ограничения на минимальный и максимальный параллаксы, которые считаются неубывающими по мере уменьшения дальности. Алгоритм к ошибкам определения параметров контура, обусловленным искажениями в электронно-оптическом тракте системы.

Недостаток метода отождествления контурных сегментов заключается в малой информативности получаемых данных о рельефе на сравнительно ровной поверхности, когда изображение представляет текстуру с малым количеством упорядоченных перепадов интенсивности. Поэтому необходимо извлекать дополнительную информацию в промежутках между найденными контурами, используя для этого корреляционные и эвристические методы.

Увеличение количества опорных точек и выравнивание их плотности могут быть достигнуты с помощью других представлений стереопары и, в частности, на списках векторов коэффициентов Фурье, вычисляемых на фрагментах в окне сканирования изображений вдоль линии базиса. Число коэффициентов в каждом таком векторе фиксировано и существенно меньше числа элементов в окне сканирования. При этом в списки помещаются лишь те векторы, коэффициенты которых аппроксимируют соответствующий фрагмент изображения с заданной точностью. Идентификация векторов в указанных списках может быть произведена с помощью алгоритма, применяемого для отождествления контуров.

Структурная схема системы зрения, реализующей данный метод, изображена на рис. 6.26. Синхронизация ТВ-камер и коммутатора (К) видеоканалов производится от синхрогенератора (СГ). Коммутатор производит поочередное считывание соответствующих полос стереоизображений; блок предварительной обработки (БПО) – оцифровку этих полос и формирование макропикселов для повышения быстродействия последующей обработки; в цифровой вычислительной машине (ЦВМ) производятся анализ полос стереопары и вычисление координат опорных точек, полученных в результате анализа. Для оперативного анализа модели внешней среды вычисляемые системой опорные точки проектируются в план и выводятся на экран монитора. Ошибка определения координат точек рельефа не превышает 3 % от величины координаты



дальности, а качество воспроизведения рельефа местности достаточно для определения характерных образований. Для уменьшения влияния ложных отождествлений и повышения полноты математической модели рельефа возможно применение интерполяции с использованием сглаживающего фильтра.

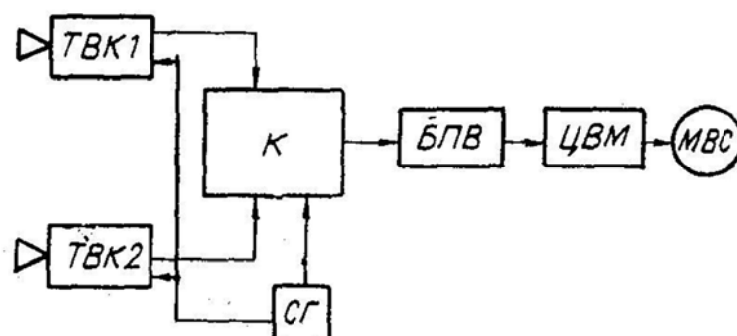


Рис. 6.26. Структурная схема стереотелевизионной системы:  
 ТВК1 – верхняя телевизионная камера, ТВК2 – нижняя телевизионная камера,  
 К – коммутатор, СГ – синхрогенератор, БПВ – блок предварительных вычислений,  
 ЦВМ – цифровая вычислительная машина, МВС – модель внешней среды

При использовании в качестве ЦВМ компьютера типа РСХТ обработка 30 пар полос размером  $8 \times 450$  элементов (анализ стереопары изображений и вычисление координат опорных точек) составляет 15...20 с. Основные затраты (90 %) приходятся на вычисление свертки при обнаружении перепадов и определении параметров контуров. Выполнение операции свертки на специализированных вычислительных устройствах позволяет сократить время обработки приблизительно в 10 раз. Дальнейшее повышение быстродействия системы может быть достигнуто за счет распараллеливания обработки полос на стереоизображениях. Стереопарная съемка рельефа сложной формы с борта планетохода под малыми углами к поверхности имеет принципиальные ограничения, снижающие точность и полноту модели внешней среды, формируемой на выходе системы. Причина этого заключается в наличии больших уклонов и частых разрывов «видимой» поверхности в направлении наблюдения, что приводит к недостаточности видеоинформации для модификации некоторых точек стереопары (на одном кадре могут наблюдаться точки, отсутствующие на другой).

Этот эффект имеет место на участках изображений соответствующих «складкам» поверхности, и в значительной степени устраняется при многостереопарной съемке, в которой используются более двух центров проекции и соответствующее число стереоизображений. Для такой съемки разработан метод анализа набора многостереопарных

изображений, позволяющий построить трехмерную модель наблюдаемой поверхности без идентификации фрагментов стереоизображений.

Набор таких изображений может быть получен одним из следующих вариантов многостереопарной съемки: несколькими идентичными телевизионными камерами с параллельными главными оптическими осями и центрами проекции, расположенными на одной прямой, на равных расстояниях между ними; одной телевизионной камерой, перемещающейся поступательно по прямой и производящей покадровую съемку при прохождении равных расстояний.

Для автоматического определения координат точек наблюдаемой поверхности производится построение так называемых паралаксограмм (рис. 6.27). Каждое изображение множественной стереопары делится на равное число полос, параллельных стереобазису, и из каждого производится выборка одной полосы, расположенной на одной и той же координате  $z_i$ . Выбранные полосы собираются в один «пакет» в порядке расположения центров проекции соответствующих изображений на стереобазисе. Построенные таким образом паралаксограммы обладают свойством отображать точки наблюдаемых поверхностей в виде линейных сегментов, по смещению и наклону которых однозначно могут быть определены пространственные координаты этих точек поверхности. Описанный метод включает две процедуры обработки видеoinформации – построение паралаксограмм и их анализ.

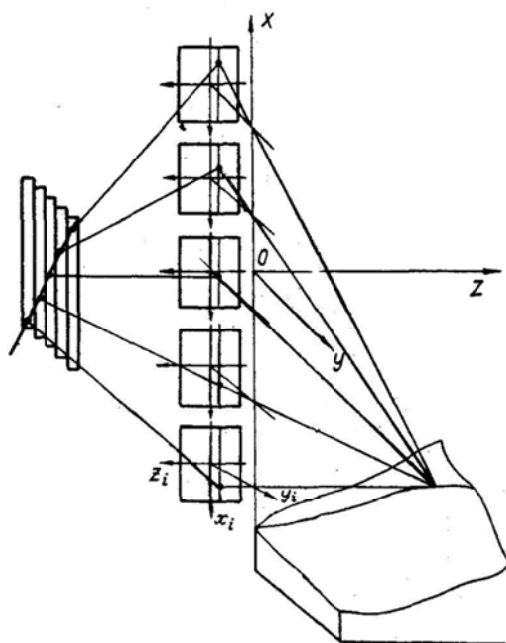


Рис. 6.27. Схема многостереопарной съемки и построения паралаксограмм (вертикальный базис)

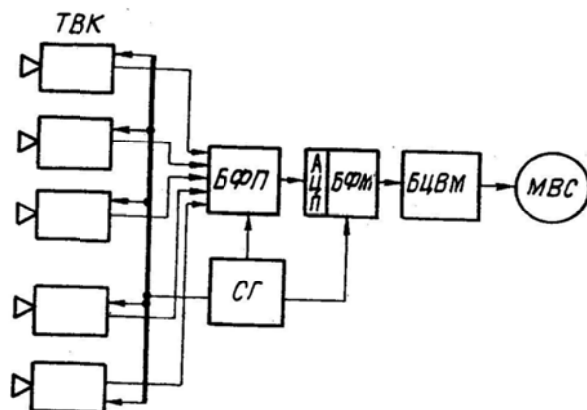


Рис. 6.28. Структурная схема многостереопарной системы:  
 ТВК – телевизионные камеры, СГ – синхрогенератор,  
 БФП – блок формирования параллаксаграмм,  
 БФМ – блок формирования «макропиксел», БЦВМ – бортовая ЦВМ,  
 МВС – модель внешней среды

Структурная схема многостереопарной СТЗ представлена на рис. 6.28. От нескольких синхронно работающих ТВ-камер. (ТВК) видеосигналы поступают в блок формирования параллаксаграмм (БФП), где производится построчная коммутация видеоканалов. Видеосигнал на выходе указанного блока представляет «изображение» параллаксаграмм, которое затем поступает в блок формирования макропикселов (БФМ), обеспечивающий суммирование пикселов в скользящем окне, и далее, через аналого-цифровой преобразователь – в память БЦВМ. Анализ параллаксаграмм производится программными средствами обнаружения контуров и определения параметров их смещения и наклона, по которым вычисляются трехмерные координаты соответствующих точек наблюдаемой поверхности (модель внешней среды – МВС).

Проведенные исследования показали возможность построения СТЗ с использованием 5...6 телевизионных камер и ЭВМ типа РСХТ (в качестве БЦВМ), оснащенной дополнительными устройствами, указанными на блок-схеме (рис. 6.28). Такая система по сравнению со стереопарной позволяет увеличить число восстанавливаемых опорных точек в сечении и точность определения их координат. Следует отметить, что применение блока предварительной обработки позволяет получить время цикла  $T = 1-2$  с, требуемое для обработки 16 сечений, по тридцать точек в каждом (одного телевизионного кадра).

Многостереопарная съемка может быть реализована с использованием одной телевизионной камеры, перемещающейся вместе с роботом по траектории, близкой в прямой. В этом случае производится покадровая съемка из различных пространственных точек, в результате чего формируется последовательность изображений с динамическим пара-

лаксом. Отмеченное свойство получаемых таким образом изображений позволяет восстановить по ним наблюдаемую поверхность в трехмерных координатах.

Особый интерес представляет съемка телевизионной камерой, ориентированной в направлении движения. Обработка последовательности изображений значительно упрощается при стабилизации изображения относительно координатных осей мишени телевизионной камеры. Это может быть выполнено по сигналам от датчика гировертикали с помощью оптико-механических или электронных устройств в процессе получения или считывания изображений.

Использование электронных устройств стабилизации изображений имеет преимущества перед механическими по быстрдействию, надежности и по ряду других характеристик. В этом случае может быть получена последовательность взаимно согласованных стереоизображений с продольным базисом, для анализа которой возможно использовать паралаксограммы. Такой пакет представляет «радиальную» паралаксограмму, в которой каждая пространственная точка отображается во множество точек, расположенных на гиперболическом сегменте, имеющем практически одинаковую интенсивность. «Радиальные» паралаксограммы с помощью обратного преобразования можно перестроить в линейные, на которых изображения одной и той же пространственной точки располагаются на отрезке прямой. Последнее позволяет для выделения краев однотонных линейных структур использовать операторы выделения контурных штрихов. Изложенный метод исследован на экспериментальных изображениях сложного рельефа, и в результате соответствующей обработки получены профили по сечениям этих изображений.

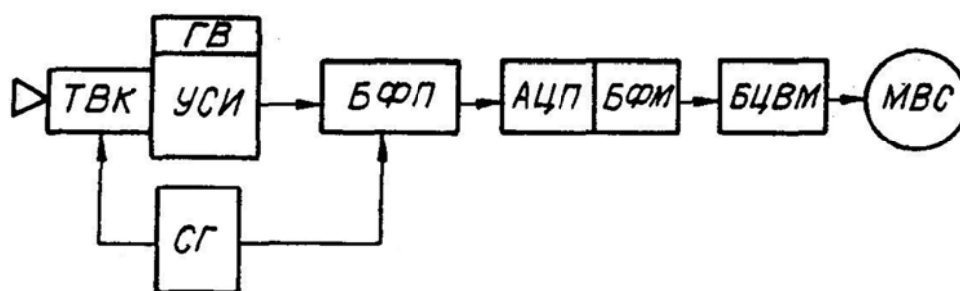


Рис. 6.29. Структурная схема с динамическим паралаксом:  
 ТВК – телевизионные камеры, УСИ – устройство стабилизации изображения,  
 ГВ – гировертикаль, БФП – блок формирования паралаксограмм,  
 СГ – синхрогенератор, БФМ – блок формирования «макропиксел»,  
 БЦВМ – бортовая ЦВМ, МВС – модель внешней среды

Структурная схема системы с динамическим паралаксом показана на рис. 6.29. Здесь последовательность изображений, получаемых от те-

левизионной камеры, с помощью устройства стабилизации (УСИ) от датчика гировертикали (ГВ) приводится к взаимному согласованию по трем степеням свободы – двум линейным перемещениям и углу вращения. Далее согласованные изображения поступают в блок формирования «радиальных» паралаксограмм с последующим их обратным преобразованием. Паралаксограммы в виде цифровых массивов поступают в БЦВМ, где производится их анализ: выделение контуров в скользящем окне, определение их наклонов и смещений, вычисление координат пространственных точек наблюдаемой поверхности, на основе которых производится построение модели внешней среды.

Рассмотренные СТЗ обладают в значительной степени противоречивыми характеристиками. Поэтому сравнительный анализ таких систем возможен лишь по совокупности признаков. Последними являются эксплуатационные характеристики: дальность и угол обзора, быстродействие и точность, энергопотребление и масса и т. п., причем для сопоставления систем целесообразно использовать сравнительные оценки качества указанных параметров.

#### **6.6.2. Системы технического зрения для контроля формы полупроводниковых изделий**

В настоящее время уделяется большое внимание разработке СТЗ, предназначенных для автоматизации контроля качества различных изделий электронной промышленности (полупроводниковых кристаллов, пластин и т. п.). Одним из путей реализации СТЗ является создание зрительных систем на основе универсальных микроЭВМ.

Система технического зрения данного типа, предназначенная для автоматического контроля качества изготовления полупроводниковых изделий, например, кристалла или пластины (соответствие формы (конструкции) эталону и наличие механических повреждений), приведена на рис. 6.30, она состоит из следующих устройств: оптического микроскопа (М), телевизионной камеры (ТК), буферного запоминающего устройства (БЗУ), перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ), электронного диска памяти (ЭД), блока дальней связи (БДС), интерфейса (И), управляемого источника питания (УИП), блока ключей (БК), блока осветителей (БО), модуля управления цветным монитором (МУЦМ), цветного монитора (ЦМ), черно-белого монитора (ЧБМ) и ЭВМ. На схеме оптические связи показаны пунктирными линиями, а электрические – сплошными.

Полный цикл работы СТЗ содержит два этапа – обучение (получение информации об эталонном кристалле) и работа (получение необходимой информации о контролируемом кристалле). Этап обучения может

быть выполнен либо занесением информации в память СТЗ путем непосредственного считывания изображения эталонного кристалла, либо занесением эталонной информации (в ЭД или ППЗУ) программным путем. В данной СТЗ используется первый способ обучения, который начинается с установления необходимой подсветки, обеспечиваемой интерфейсом (устройство И-2), УИП, БК, БО (собранным на светодиодах типа АЛ107А), в рабочей зоне микроскопа (типа ПМЕ-1 или МБС-9).

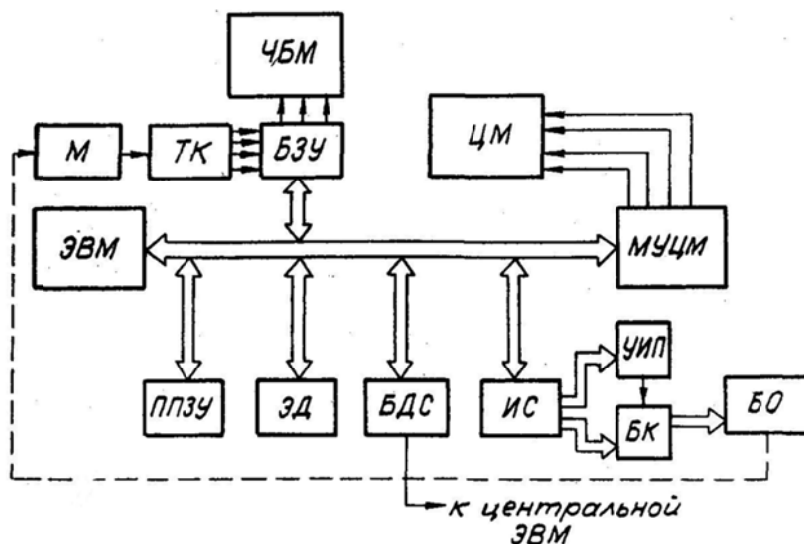


Рис. 6.30. СТЗ, предназначенная для автоматического контроля качества изготовления полупроводниковых изделий

Блок осветителей содержит различное число источников света, сила света, очередность включения и рабочая частота которых управляются от ЭВМ. Источники света располагаются вокруг объекта контроля (кристалла). Изображение кристалла, находящегося в рабочей зоне микроскопа, воспринимается телевизионной камерой, считывается (записывается) в БЗУ, осуществляющее запоминание одного кадра изображения размерностью  $256 \times 256$  и 16-ю градациями яркости (64К 4-разрядных слов). Далее эталонное изображение переписывается в ЭД (емкостью 2000 Кбит), обеспечивающий запоминание восьми кадров изображений. При перезаписи эталонной информации в ЭД производится обработка изображения (фильтрация, сегментация), что позволяет представить более качественное изображение и существенно повысить точность и быстродействие работы СТЗ. На этом процесс обучения СТЗ заканчивается. Далее начинается этап работы СТЗ, который заключается в получении информации о кристалле. Программа работы СТЗ, разработанная на языке Ассемблер, записывается в ППЗУ. С помощью БДС (типа БДС-60) осуществляется связь микроЭВМ СТЗ с центральной ЭВМ.

Оригинальными устройствами СТЗ являются БЗУ и ЭД, которые приведены соответственно на рис. 6.31 и 6.32. БЗУ состоит из блока предварительной обработки – (БПО), АЦП, блока памяти (БП), синхронизатора (С), ЦАП, схемы адресации (СА), блока связи (БС) и блока управления (БУ).

Буферное запоминающее устройство работает в следующих режимах: 1) записи кадра изображения с ТК в БП с одновременным контролем вводимого изображения на ЧБМ; 2) чтения информации из БП в ЭВМ; 3) записи информации из ЭВМ в БП (для контроля обработанного изображения) на ЭВМ.

В первом режиме работы БЗУ производится запись кадра изображения с ТК в БП, осуществляемая за 20 мс, а синхронизация БЗУ – через БС кадровыми и строчными синхроимпульсами и тактовыми импульсами. Видеосигнал с ТК поступает на БПО, с помощью которого он усиливается и фильтруется. Четырехразрядный АЦП, управляемый синхронизатором, преобразует аналоговый видеосигнал в цифровой код, соответствующий 16 уровням сечения видеосигнала. Синхронизатор управляет записью кадра изображения в БП по адресу, формируемому СА. Запись изображения в БП разрешается сигналами, формируемыми в БУ (использующим соответствующие сигналы через БС от ЭВМ). Для отображения видеоинформации, записанной в БЗУ, цифровой код с выхода БП преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал, поступающий на ЧБМ.

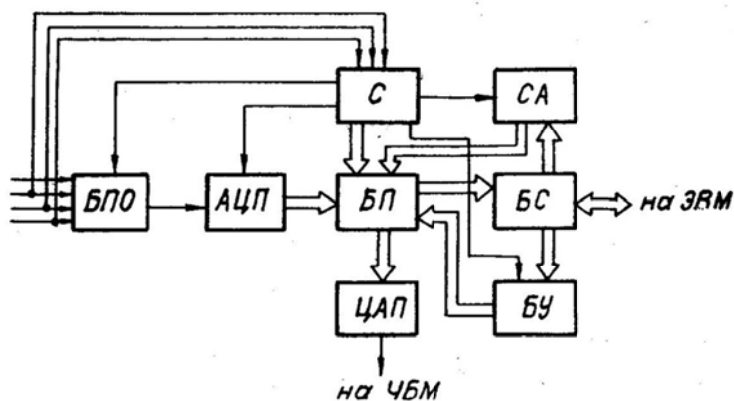


Рис. 6.31

Во втором режиме работы БЗУ чтение информации из БП в ЭВМ, управление БЗУ осуществляется по командам из ЭВМ, принимая которые СА и БУ организуют рабочий цикл, вырабатывают адреса, сигналы чтения и управления БП. По этим командам ЭВМ последовательно считывает содержимое ячеек памяти БП, при этом ЭВМ последовательно изменяет адрес в СА.

В третьем режиме работы БЗУ запись информации из ЭВМ в БЗУ осуществляется следующим образом: СА последовательно изменяет адреса ячеек памяти БП, а БУ формирует сигналы записи и управления БП; изображение записывается в БП с одновременной индикацией его на экране ЧМБ. БЗУ выполнено в стандарте микроЭВМ, занимает одну полную плату и реализовано на 16 микросхемах 565РУЗ.

На рис. 6.32 приведена структурная схема ЭД, которая состоит из тактового генератора (ТГ), счетчика адреса регенераций (САР), формирователя сигналов управления памятью (ФСУП), блока местного управления (БМУ), формирователя адреса (ФА), ОЗУ, БС. Со стороны микроЭВМ устройство представлено 4-мя регистрами: адреса кадра, адреса строки, адреса столбца и данных. Организация ОЗУ: 8 блоков по  $256 \times 256 \times 4$  бит (32 Кбайт). Общий объем памяти ЭД 512 К 4-разрядных слов. Устройство работает в трех режимах: 1) записи информации на микроэвм, 2) регенерации, 3) чтения информации в микроЭВМ.

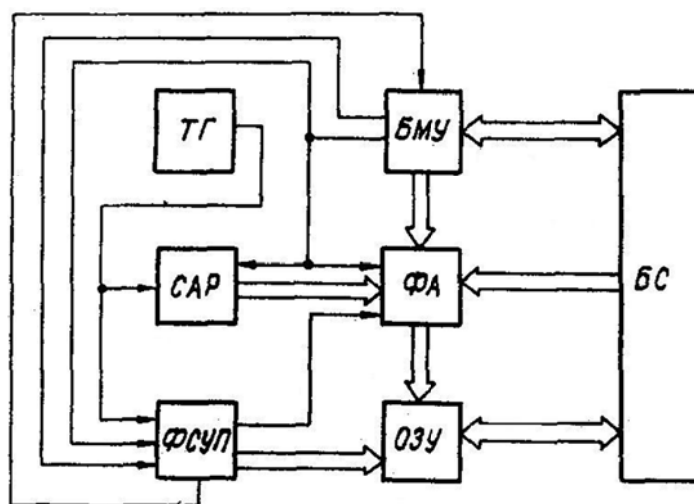


Рис. 6.32. Структурная схема ЭД

В режиме записи БМУ вырабатывает сигнал «Обращение к ОЗУ», который поступает в САР, ФА и ФСУП. В результате этого осуществляются следующие операции ЭД:

- приостанавливается регенерация на период обращения к памяти и сохраняется текущее состояние САР;
- из ФА в ОЗУ поступает сначала адрес строки, к которой происходит обращение, а затем по сигналу из ФСУП адрес столбца;
- ФСУП вырабатывает все необходимые сигналы для запоминания во внутренних регистрах микросхем памяти адресов строки и столбца, а также для записи данных именно в ту группу микросхем (кадр), к которой мы обращаемся.



После окончания цикла записи устройство переходит в режим регенерации, который осуществляется путем обращения к каждой из 256 строк всех кадров с быстродействием 2 мкс. Режим чтения аналогичен режиму записи и отличается тем, что сигнал «запись» не вырабатывается, а на БС с БМУ поступает сигнал, разрешающий передачу данных из ОЗУ в микроЭВМ.

Электронный диск выполнен конструктивно в стандарте микроЭВМ (одна полуплата). Оперативная память ЭД собрана на 32 микросхемах 565PY5. Программное обеспечение СТЗ, разработанное на языках QUASIC и Ассемблер, позволяет проводить следующие операции контроля полупроводниковых кристаллов или пластин: оценивать правильность формы (расположение составляющих конструкций кристалла), измерять геометрические характеристики (площадь, линейные размеры, например, длина, ширина, периметр контура), определять механические повреждения (наличие и размеры сколов и царапин).

Один цикл работы СТЗ состоит из следующих трех этапов: выделения границ кадра изображения, предварительной обработки изображения, извлечения необходимой информации.

На первом этапе функционирования СТЗ производится выделение границ изображения, осуществляемое с целью устранения мешающих элементов (помех) изображения или для создания квадратного кадра изображения. На втором этапе осуществляются фильтрация и выделение контуров.

Фильтрация изображения используется для уменьшения влияния различной природы шумов и помех. Эта операция осуществляется одним из трех способов: пороговым методом, низкочастотной фильтрацией, медианной фильтрацией.

Пороговый метод основан на измерении яркости всех элементов изображения, сравнении этой яркости со средней яркостью ближайших элементов изображения и замене измеренной яркости на среднюю. Низкочастотная фильтрация осуществляется с помощью свертки исходного массива изображения с корректирующим массивом. При медианной фильтрации используются такие способы, как окно из трех или пяти элементов, крест из пяти или девяти элементов, взвешенно медианная (последовательно по вертикали и горизонтали) из трех или пяти элементов.

Операция выделения контуров основана на применении одного из методов: дифференциального оператора Робертса или Собела, логарифмического детектора Уолша, формирования контура путем анализа 4-х или 8-и соседних точек изображения. Выбор способа фильтрации и выделения контуров определяется геометрическими и световыми характеристиками кристалла, требуемыми быстродействием и точностью работы СТЗ.

На третьем этапе работы СТЗ проводятся все необходимые измерения видимой верхней плоскости кристалла. Алгоритмическое обеспечение операций включает 1) «просмотр» плоскости кристалла; 2) измерение длины, ширины, периметра, площади и углов; 3) определение правильности соотношения конструкции (например, диаметр и допустимое отклонение от центра контактной площадки; 4) оценку наличия и величины площади, сколов, царапин кристаллов. Для анализа геометрических характеристик используется эталонный массив, сформированный в процессе обучения СТЗ. Оценка дефектов кристалла основана на корреляционном методе сравнения изображений.

При испытании СТЗ получены следующие характеристики: разрешающая способность 0,2 % от размера кадра изображения; точность оценки линейных размеров (суммарная) случайная (среднеквадратическое отклонение) и систематическая составляющие ошибки измерения 0,1 % от размера кадра изображения при контролируемом размере кристалла 3000×3000 мк; время контроля одного кристалла 0,1...10 с в зависимости от требуемых измерений и сложности формы кристалла. Следует отметить, что СТЗ можно также использовать для контроля размера полупроводниковых приборов (диодов, триодов). Описанный вариант СТЗ более пяти лет успешно эксплуатируется в Томском институте автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Стоимость СТЗ (включая ЭВМ) около 13 тыс. руб.

Таким образом, описанная СТЗ дешева и отличается от известных более широкими возможностями, например, за счет подключения СТЗ к вычислительной сети, и удобством обслуживания вследствие вывода изображения на черно-белый или цветной мониторе.

Другим вариантом описанной СТЗ является реализация их в виде специализированного вычислительного устройства (рис. 6.33).

Система технического зрения предназначена для:

а) обнаружения и определения положения малоконтрастных объектов произвольной формы на плоскости путем корреляционного сопоставления с эталоном (сопоставление производится как для полутонных, так и для бинарных изображений в реальном масштабе времени);

б) распознавания формы сложных объектов, контроля различных поверхностей;

в) классификации объектов по различным признакам (уровень амплитуды сигнала, текстура, геометрические параметры и т. д.).

Функциональная схема СТЗ состоит из следующих устройств: 1 – телевизионного датчика (ТВД), 2 – АЦП/ЦАП, 3 – адаптера ЭВМ, 4 – процессора поточечных операций, 5 – процессора ЭВМ, 6 – процессора свертки, 7 – оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), 8 – кон-

троллера накопителя на гибких магнитных дисках (КНГМД), 9 – накопителя на гибких магнитных дисках (НГМД), 10 – процессора морфологических операций, 11 – контроллера цветного графического дисплея (КЦГД), 12 – видеоконтрольного устройства (ВКУ), 13 – видеопроцессора, 14 – интерфейса радиального параллельного (ИРП), 15 – синхрогенератора, 16 – управляющей ЭВМ.

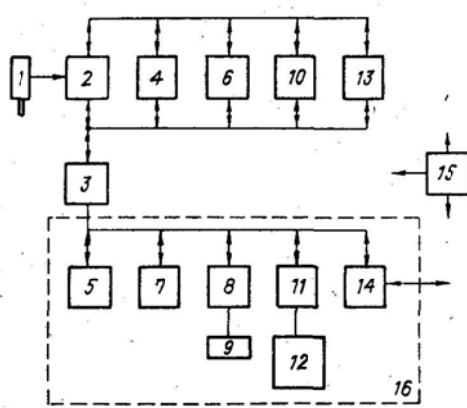


Рис. 6.33

Она представляет собой цифровую вычислительную систему, состоящую из 4-х спецпроцессоров, объединенных быстродействующей шиной данных (ШД) и управляемых по шине центральной ЭВМ (ШЭВМ). Спецпроцессоры могут подключаться к ШД в любой последовательности, образуя конвейер реального времени. Каждый из спецпроцессоров выполняет конкретную операцию над данными изображения или любого другого цифрового одномерного или многомерного сигналов.

В состав СТЗ входят: ТВД, процессор поточечных операций (ППО), процессор свертки  $5 \times 5$  (ПСВ), процессор морфологических операций (ПМО), ВП, АЦП/ЦАП, синхрогенератор, адаптер ЭВМ. Все процессоры работают со скоростью одна операция в 100 нс (10 МГц). ППО предназначен для построения гистограмм, логических и арифметических операций над изображениями организации рекурсивных вычислений, ПСВ выполняет операции свертки над двумерными и одномерными данными. Общий объем ЗУ коэффициентов (эталона)  $160 \times 160 \times 8$  бит. ПМО производит морфологические операции (анализ связности, дилатация, пространственно-логическая фильтрация, формирование остова) над двумерными данными изображения. ВП предназначен для аффинных преобразований двумерных данных (смещение, поворот, растяжка, сжатие), а также для обеспечения обработки данных типа «баттерфляй». Кроме того, ВП оснащен ЗУ графики и программируемым знакогенератором, а АЦП/ЦАП позволяет считывать данные

сигналы изображения с выходов двух телевизионных датчиков одновременно на ШД и записывать их либо непосредственно в два ЗУ емкостью  $512 \times 512 \times 8$  бит, либо через конвейер спецпроцессоров, а также считывать сигналы данных изображения с ШД через ЦАП на вход ВКУ во время обработки изображения. Синхрогенератор формирует (в зависимости от заданной программы) набор синхросигналов для СТЗ и телевизионных датчиков.

Система имеет два варианта исполнения шины ЭВМ – ЕС1840, ЕС1841, типа «Q-BUS», а также соответственно два варианта управления от ЭВМ типа ЕС1840, ЕС 1841 и семейства «Электроника» (ДВК).

В СТЗ встроена ЭВМ, программно и физически совместимая с ЭВМ ЕС1840 (в качестве альтернативной может использоваться МС1201.02), которая включает в себя ОЗУ 256 Кбит, КНГМД, НГМД, КЦГД и ИРП, КЦГД и обеспечивает вывод на дисплей как буквенно-цифровой информации, так и сигнала изображения ТВД или ШД в момент обработки изображения, а также цветовое кодирование сигналов и символов (например, в зависимости от результатов сегментации изображения). Кроме того, КЦГД может выводить реальное цветное изображение из трех секций ЗУ на дисплей одновременно.

Основные операции обработки изображения:

- синтез КИХ- и БИХ-фильтров для фильтрации изображения (подавление шума, помех, коррекция неравномерности фона и обнаружение объектов с заданными характеристиками);
- корреляция, свертка, вычисление статистических характеристик (скользящее среднее, дисперсия, медиана);
- сегментация изображений в соответствии с заданными критериями (уровень полутона, спектральная плотность, текстура, скользящие статистики);
- выделение контуров изображений;
- бинаризация с плавающим порогом, вычисленным по скользящей гистограмме;
- анализ связности, определение геометрических параметров объектов, маркировка их в соответствии с заданным критерием;
- определение положения объектов с точностью  $\pm 1/2$  дискрета (с возможностью интерполяции до  $1/4$ );
- определение геометрических параметров объектов (площадь, периметр и др.);
- компенсация (или учет) геометрических искажений телевизионных датчиков;
- распознавание объектов, изменяющих свои масштабы, система технического зрения выполнена в виде блока на 20 плат типораз-

мера 8 и с отдельным блоком питания и блоком вентиляторов. Входы и выходы сигналов ТВД, ВКУ, цветного дисплея, сигналов синхронизации, ИРП, дисковода расположены на передней и задней панелях блока системы. Источники питания скомпонованы в виде отдельного блока.

Система технического зрения внедрена в установке ЭМ-4185 и обеспечивает следующие технологические параметры:

- время распознавания изображения объекта – 0,15 с;
- смещение объекта в поле зрения ТВД –  $\pm 0,5$  мм;
- погрешность определения координат объекта –  $\pm 5$  мкм;
- надежность распознавания – 0,997.

Вторым вариантом специализированной СТЗ является зрительная система, предназначенная для оценки положения контактной площадки кристалла (рис. 6.34). СТЗ включает в себя два основных устройства: оптико-телевизионное и обработки сигнала изображения.

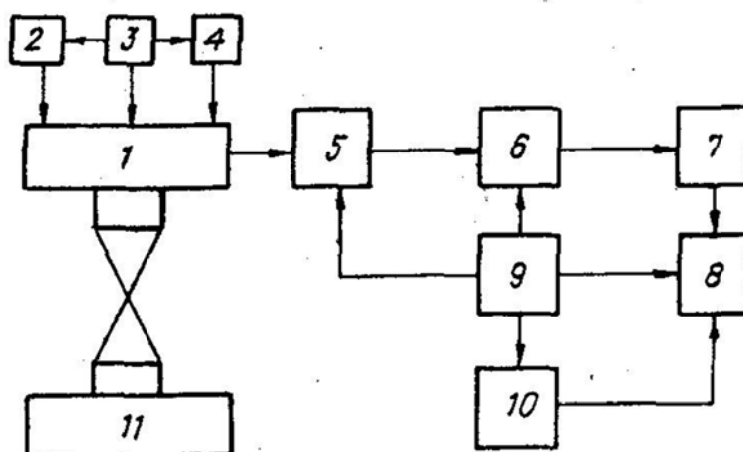


Рис. 6.34. Блок-схема системы технического зрения для определения положения объекта на плоскости:

- 1 – телевизионный датчик; 2 – блок развертки; 3 – синхро-генератор;  
 4 – высоковольтный источник питания; 5 – блок регистрации пятен;  
 6 – блок стробов; 7 – блок вычисления геометрического центра пятен;  
 8 – блок преобразования координат; 9 – блок управления;  
 10 – блок оперативного запоминающего устройства; 11 – рабочий стол

Одним из важнейших параметров оптико-телевизионного устройства является температурная стабильность линейных размеров телевизионного растра. Для обеспечения требуемого значения данного параметра был разработан метод стабилизации отклоняющих токов и электрическая схема узла разверток телевизионного датчика, обеспечивающая требуемую степень стабилизации (0,1 % на 5 °С).

Устройство обработки сигнала изображения должно обеспечивать реализацию алгоритма идентификации изображения объекта за время 0,3...0,5 с. С целью обеспечения данного параметра было предложено все основные операции алгоритма идентификации изображения объекта выполнять аппаратно.

Устройство обработки сигнала изображения состоит из следующих блоков: регистрации пятен изображения сцены, стробов, вычисления координат геометрического центра изображения пятен сцены, преобразования координат, управления, ОЗУ.

Каждый блок является цифровым автоматом, обеспечивающим формирование на своем выходе соответствующих данных, необходимых для выполнения следующей операции алгоритма идентификации. Работа каждого блока синхронизируется сигналами, вырабатываемыми соответствующим блоком. В результате обработки сигнала изображения на выходе блока преобразования координат формируется значение, характеризующее положение зон объекта. Блок-схема алгоритма СТЗ приведена на рис. 6.35.

На основании этого алгоритма разработана система технического зрения для определения положения объекта, обеспечивающая быстродействие 0,32 с, точность определения координат контактных площадок кристалла  $\pm 10$  мкм, при максимальном разбросе положения кристалла по координатам  $X, Y \pm 500$  мкм, углу  $\pm 5^\circ$  и внедрена в составе установок ЭМ-490КЗ, ЭМ490Б.

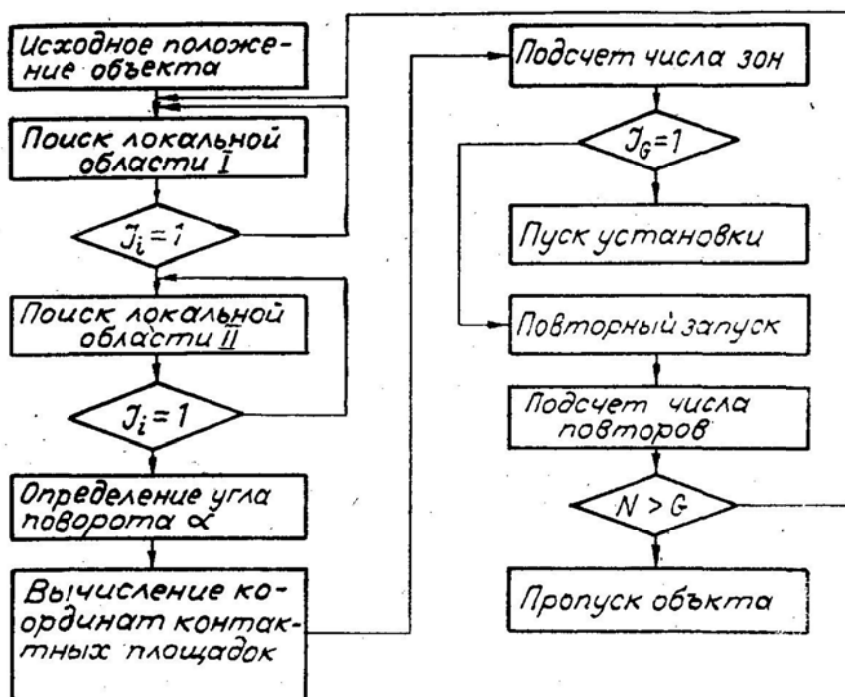


Рис. 6.35. Блок-схема алгоритма СТЗ

### 6.6.3. Системы технического зрения для контроля печатных плат и фотошаблонов

Контроль топологии печатных плат (ПП) является сложным и трудоемким процессом, автоматизации которого уделяется большое внимание. Разработка технологического оборудования для автоматизации контроля печатных плат и фотошаблонов требует решения следующих основных задач: 1) создания высокопроизводительных технологических установок для автоматического нахождения дефектов; 2) разработки технических средств для автоматизации маркирования дефектов участков; 3) создания технологических установок для автоматического устранения дефектов участков. В идеале достаточно решить первую и третью задачи.

Решение первой задачи связано с разработкой наукоемкого, дорогостоящего, в некотором смысле уникального оборудования. Маркировка мест дефектов необходима, если дальнейшее устранение их осуществляется человеком (например, устранение закороток, остатков меди и т. д.). При разработке технологических установок для автоматического устранения дефектов целесообразно использовать уже известные технические решения (например, точная фрезеровка мест дефектов или удаление дефектных участков с помощью технологического лазера).

Программное обеспечение AP, разработанное на языках Квейсик и Ассемблер, позволяет управлять МС и выполнять следующие функции СТЗ: измерять габариты ПП; определять размеры разъемных соединений (ламель) ПП; оценивать размеры отверстий; измерять размеры контактных площадок; определять координаты центров отверстий относительно базовой привязки (базового размера); оценивать недопустимые сближения (замыкания) проводников (площадок); оценивать разрывы проводников. Структурная схема многопроцессорного варианта AP для контроля топологии ПП приведена на рис. 6.36.

AP состоит из СТЗ (телевизионной камеры (ТК), блока ввода контурных изображений (БВКИ), видеопроцессора (ВП), световолоконного элемента (СВЭ), механизма подъема-опускания (МПО), первого блока управления (БУ<sub>1</sub>), механизма смещения (МСм), блока управления по оси «Z» (БУ<sub>z</sub>), электронного диска (ЭД), перепрограммируемого постоянного устройства (ППЗУ), модуля управления цветным монитором (МУЦМ); блока меток (БМ) (устройства метки (УМ), блока управления (БУ<sub>2</sub>), блока подсветки (первый и второй источники света (ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub>), регулируемых источников питания нижней и верхней подсветки РИПНП, РИПВП, первого и второго устройства связи с осветителями УС01, УС0), механизма сканирования (подставки (П), линейных шаговых двигателей по осям X и Y (ЛШД<sub>x</sub>, ЛШД<sub>y</sub>), блока ручного управления

(БРУ)); периферийного оборудования (первого и второго видеоконтрольных устройств (ВКУ<sub>1</sub>, ВКУ<sub>2</sub>) алфавитно-цифрового печатающего устройства (АЦПУ), графопостроителя (ГП)). На управляющей микро-ЭВМ (ДВК-3, ДВК-4, «Электроника МС 1212», «Электроника МС0585», ЕС1840, ЕС1841) производятся некоторые вычислительные операции и синхронизация работы АР. В качестве датчика видеоинформации применена ТК с фотоприемником на ПЗС-матрице (КТ-2, ДВМ-2).

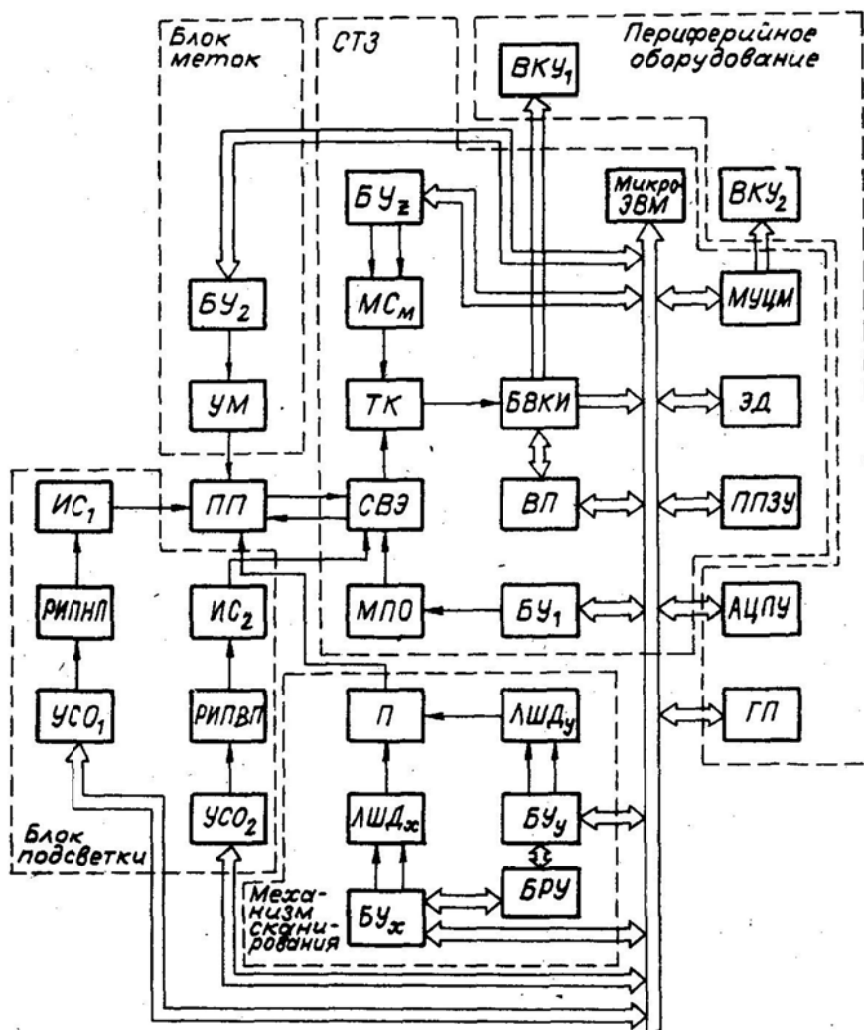


Рис. 5.36. Структурная схема многопроцессорного варианта АР для контроля топологии ПП

Один цикл работы АР состоит из двух этапов: обучения и контроля. Целью обучения является подготовка информации об эталонной ПП, а контроля – получение информации о дефектах ПП. Этап обучения может быть выполнен либо занесением информации в память системы (в ЭД или в память ЭВМ) путем непосредственного считывания изображения эталонной ПП либо занесением информации программным пу-



тем. Обучение начинается с установления необходимой высоты размещения ТК над ПП. Подъем и опускание ТК управляются по сигналам от ЭВМ через БУ и МСм. После фиксации ТК над ПП включается необходимая подсветка (нижняя подсветка, обеспечиваемая УС0<sub>1</sub>, РИПНП, ИС<sub>1</sub> и используемая для контроля отверстий, и верхняя подсветка, обеспечиваемая УС0<sub>2</sub>, РИПНП, ИС<sub>2</sub> и используемая для контроля проводящего рисунка и размеров ламелей и платы). Оба канала подсветки, выполненные аналогично, управляют освещением следующим образом. Через УС0<sub>1</sub>, УС0<sub>2</sub> производится соответственно связь ЭВМ с РИПНП и РИПВП, которые преобразуют цифровые сигналы в аналоговые и устанавливают заданный уровень сигналов управления ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub>, фиксирующий требуемое освещение ПП.

С помощью смещаемой части механизма сканирования устанавливается требуемый участок ПП перед ТК. Основным устройством механизма сканирования является двухкоординатный электропривод, состоящий из двух линейных шаговых двигателей ЛШД<sub>х</sub>, ЛШД<sub>у</sub> и блока управления. Каждый двигатель представляет собой электромагнитный модуль, включающий подвижный элемент (индуктор) на магнитно-воздушном подвесе и неподвижную часть (статор), имеющую нарезку зубцов с шагом 0,64 мм. БУ обеспечивает формирование сигналов на перемещение индуктора двигателями с применением электрической редукции и электромагнитного демпфирования колебаний индуктора. Для осуществления перемещений индуктора в БУ из ЭВМ направляется сигнал, характеризующий режим и параметры перемещения (скорость, ускорение, число шагов). Движение индуктора может производиться в ручном режиме от БРУ. Для размещения ПП на механизме сканирования используется подставка.

После фиксации необходимого участка ПП перед ТК на этот участок с помощью МПО устанавливается СВЭ, используемый для формирования качественного (безбликового) изображения. Управляется МПО от ЭВМ через БУ. В системе применены две схемы формирования изображения, использующие световолоконные пластины и кабели. После установки СВЭ на ПП телевизионной камерой воспринимается изображение, которое преобразуется в БВКИ в контурное изображение, обрабатываемое ВП.

Видеопроцессор состоит из 16 идентичных микропроцессорных модулей (ММ) и центрального процессора (ЦП). Каждый ММ содержит по два ОЗУ: в первом хранится программа обработки изображения, а во втором – фрагмент кадра изображения, который нужно обработать. Обработка изображения ведется одновременно (параллельно) всеми ММ. Видеопроцессор содержит три системных шины: адреса, данных и

управления. Результаты обработки изображения заносятся в первое ОЗУ. Центральный процессор управляет работой всех ММ, блоком ввода контурного изображения БВКИ и поддерживает связь с микроЭВМ. ЦП состоит из микропроцессора, ПЗУ, ОЗУ, трех устройств ввода-вывода, дешифратора адреса, шинного формирователя. В ПЗУ хранится программа управления видеопроцессором. Программы управления ММ и обработки результатов ЦП передаются из микроЭВМ через одно из устройств ввода-вывода. ЦП имеет доступ к любому из 16 ММ. Дешифратор адреса служит для выбора нужных ячеек (микросхем) памяти и устройства ввода-вывода ЦП или ММ. Шинный формирователь обеспечивает связь внутренних шин ЦП с системными шинами видеопроцессора.

После вычисления информативных признаков одного кадра изображения (размерностью  $256 \times 256$ ) формируется эталонный массив (периметры, площади, линейные размеры, число замкнутых контуров и др., заносимых в память системы), включается нижняя подсветка, устанавливается необходимая высота размещения ТК, и вычисляются размеры отверстий. Эти характеристики также заносятся в память системы. Затем производится подъем СВЭ, смещение ПП на следующий кадр, считывание и обработка ТК, БВКИ, ВП и ЭВМ очередного кадра изображения и формирование второго эталонного массива. Этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет обработано все изображение-ПП; вводимое и обработанное изображение отражаются на ВКУ<sub>1</sub>, ВКУ<sub>2</sub>. На этом первый способ обучения заканчивается.

Второй способ обучения предусматривает электронную запись в память системы (например ОЗУ) геометрических характеристик эталонных ПП, вычисленных при определенном положении ПП, ТК, ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub>. Запись информации в память роботизированной системы может производиться с гибких магнитных дисков либо с использованием вычислительной сети.

На этом этап обучения АР заканчивается. Далее начинается этап контроля, заключающийся в выявлении дефектов ПП. На этом этапе сначала вычисляются признаки текущего изображения аналогично этапу обучения, затем производится сравнение вычисленного и эталонного массивов, и принимается решение о типе дефекта ПП.

Таким образом, происходит проверка каждого участка ПП. Информация о дефектах ПП выводится на экран дисплея. Протокол проверки распечатывается на АЦПУ и регистрируется на ГП. Кроме того, место дефекта ПП помечается с помощью специального устройства меток (УМ), управляемого блоком управления (БУ2) ЭВМ.

Программное обеспечение АР реализовано на языках Си, Квейсик, Ассемблер.

Описанный вариант демонстрирует возможность на основе универсальной микроЭВМ создавать простые и дешевые СТЗ (и на их основе АР) для проверки топологии печатных плат.

Еще одним вариантом реализации СТЗ указанного применения является многопроцессорная автоматическая система контроля печатных плат. Модификацией этой системы является СТЗ для контроля счетных трафаретов и пассивных слоев толсто пленочных ГИС. В качестве датчика видеоинформации в СТЗ используется стандартная телевизионная камера «Взор». Перемещение трафарета и подложки ГИС в поле зрения видеодатчика осуществляется координатным столом типа «Зонд-А5». Для задания необходимого увеличения контролируемых в системе изображений применяется микроскоп МВС-9. Контроль счетных трафаретов производится в проходящем свете, подложки и ГИС контролируются в отраженном свете.

Контроль трафаретов осуществляется путем сравнения элементов топологического рисунка на трафарете с эталонной информацией, поступающей с САПР. Ввод эталонной информации, представленной на перфоленте, производится фотосчитывающим устройством FS-1500.

Контроль подложек ведется безэталонным методом на основе измерений ширины проводников, межпроводниковых промежутков и сравнения полученных величин с предельно допустимыми значениями, которые задаются с дисплея.

Структурная схема системы контроля счетных трафаретов и пассивных слоев толсто пленочных ГИС представлены на рис. 6.37. В ее состав входят следующие блоки: блок аналоговый (БА), блок кодирования изображения (БКИ), генератор тактовых импульсов (ГСИ), растровая память (РП), КС, ДОИ, ОЭ, ОС, блок прямого доступа (БПД), ККС, контроллер системы КАМАК (КК), ВКУ1, ВКУ2, микроЭВМ ДВК-1, считыватель с перфоленты FS-1500, дисплей РИН-609.

При работе с системой контролируемый объект устанавливается на координатный стол и освещается с помощью осветительного элемента. Телевизионная камера считывает оптический сигнал с объекта контроля, преобразует его в электрическую аналоговую форму и передает на вход БА, где происходит преобразование сигнала в цифровую форму. Полученное двухградационное изображение исследуемого объекта поступает на вход блока кодирования изображений, производящего «сжатие» информации и передачу ее через блок прямого доступа в оперативную память ЭВМ ДВК-1, которая и обрабатывает полученную информацию. Кроме обработки ЭВМ управляет работой всей системы: подает команды управления блокам БА и БКИ, запускает ГСИ, который вырабатывает последовательность импульсов, синхронизирующих ра-

боту всех блоков, управляет перемещением координатного стола, записывает информацию в растровую память.

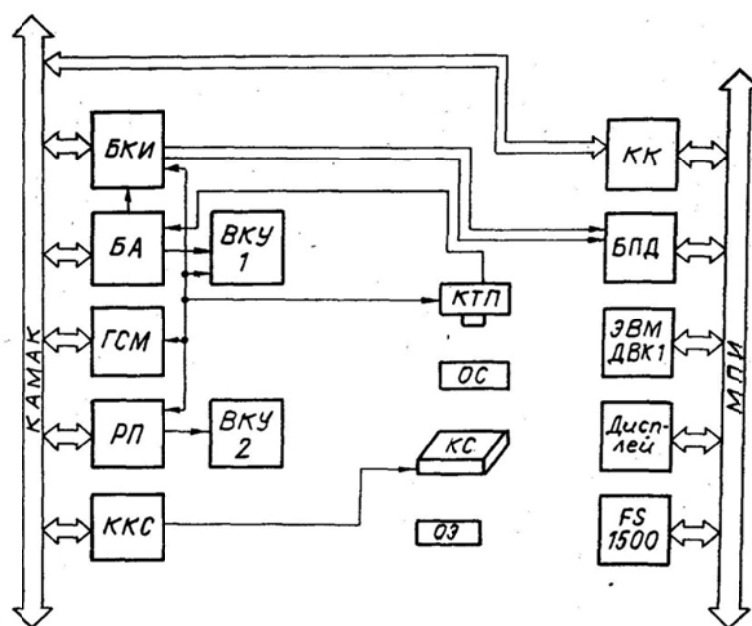


Рис. 6.37. СТЗ контроля сетчатых трафаретов и пассивных слоев толстопленочных ГИС

Для осуществления контроля за работой всей системы и принятия решения в особо сложных случаях в нее включены два устройства отображения ВКУ1, ВКУ2. ВКУ2 связано с растровой памятью и служит для отображения ее содержания. Для связи с оператором в систему включен дисплей. Рассмотрим подробнее работу системы по контролю счетных трафаретов.

Размер основного подполя равен размеру подложки микросборки ( $24 \times 36$ ), на нем отображается топология слоя. Вспомогательное подполе окружает основное, на него наносятся специальные знаки, в частности, реперные метки, необходимые для совмещения трафарета и подложки. Трафарет изготавливается по фотошаблону, который, в свою очередь, строится на координатографе по информации, поступающей с САПР в виде перфоленты. Информация на перфоленте состоит из совокупности кадров, каждый из которых описывает одно законченное действие резца координатографа.

Задача контроля топологии трафаретов осложняется тем, что изображение контролируемого объекта не является целостным, а состоит из зерен, которые представляют собой ячейки сетки. Каждый элемент топологии состоит из множества таких зерен, поэтому при решении задачи контроля основной трудностью становится избавление от фрагмен-

тации изображения. Эту трудность можно обойти следующим образом: так как каждое зерно изображения не может быть больше определенного максимального размера и. значительно меньше любого элемента топологии, то можно применить метод пирамидального преобразования. Суть метода заключается в том, что исходное изображение разбивается на квадраты, размер которых больше зерна сетки и значительно меньше любого элемента топологии. Каждому квадрату ставится в соответствие одна точка сжатого изображения по одному из следующих правил:

- расширение черного (каждая точка сжатого изображения равна нулю только в том случае, если все точки соответствующего ей квадрата исходного изображения равны нулю);

- расширение белого (каждая точка сжатого изображения равна единице только в том случае, если все точки соответствующего ей квадрата исходного изображения равны единице).

Применение метода пирамидального преобразования не требует громоздких вычислений и позволяет не только избавиться от фрагментации, но и значительно сжать объем информации, что приводит к уменьшению времени ее обработки. Однако при сжатии исходного изображения возникает погрешность, которая тем больше, чем больше коэффициент сжатия, но правильным подбором коэффициента сжатия и поля обзора телекамеры можно достичь заданной точности контроля.

В качестве эталона используется содержимое перфоленты, под управлением которой изготавливается фотошаблон счетного трафарета. Все элементы топологии трафарета имеют ортогональную структуру. На исходной перфоленте каждый элемент топологии описан совокупностью координат своих угловых точек.

Контроль качества сетчатых трафаретов осуществляется путем сравнения действительных значений координат угловых точек каждого элемента топологии с соответствующими им координатами, содержащимися на эталонной перфоленте. В связи с тем, что поле обзора телекамеры значительно меньше размеров трафарета, в процессе контроля необходимо так перемещать координатный стол, чтобы контролируемые угловые точки попадали в поле обзора. В процессе перемещения стола возникает и накапливается погрешность, которая может повлиять на точность измерения координат углов и привести к обнаружению ложных дефектов или пропуску действительного. Во избежание этого в оптимальных случаях проводится коррекция по реперной метке.

Перед началом работы оператор включает аппаратуру и запускает программу. Затем вводится эталонная перфолента, и ее содержимое раскодируется. После этого оператор так устанавливает на координатный стол контролируемый трафарет, чтобы реперная метка попала в

поле обзора телекамеры. Далее обеспечивается перемещение стола, в результате чего центр реперной метки оказывается в центре кадра и начинается непосредственно сам контроль, т. е. перемещение стола так, чтобы в поле зрения системы попадали места ожидаемого положения каждого угла. После вывода стола в точку ожидаемого положения какого-либо угла происходит поиск угла в данном месте и сравнение координат угла с координатами, заданными на эталонной перфоленте.

Если искомый угол не найден или его координаты отличаются от ожидаемых координат на величину, большую допустимой, то производится коррекция по реперной метке, в результате чего уменьшается влияние погрешности перемещения стола на точность определения координат углов.

Вывод о том, что имеет место дефект топологии, делается только в том случае, если и после коррекции угол не найден или его координаты не попадают в заданное поле допуска. В этом случае координаты искомого угла записываются в список дефектов и система переходит к контролю следующего угла. После просмотра всех углов на экран дисплея выводится список обнаруженных дефектов. Для вывода информации о каждом дефекте оператору не только сообщаются его координаты, но и тип дефекта (угол не найден, угол далеко и т. д.). При этом координатный стол выводится в точку положения и оператор может посмотреть изображение некачественного участка топологии на экране ВКУ1.

Для удобства работы оператора в системе предусмотрена индикация эталонного изображения, введенного с перфоленты, на экране ВКУ2. В процессе контроля по эталонному изображению движется мерцающий уголок (маркер), который указывает на контролируемый в данный момент угол. В процессе вывода списка дефектов маркер указывает на дефектный угол на изображении эталона. Сжатое изображение участка, находящегося под телекамерой выводится в правый нижний угол экрана ВКУ2. Программное обеспечение построено по модульному принципу и состоит из 16 модулей, написанных на языках программирования Паскаль и микроАссемблер. Общий объем программного обеспечения составляет 530 операторов. Занимаемый комплексом объем ОП-16 Кбайт.

Для обеспечения заданной точности контроля пассивных слоев ГИС рабочий размер раstra выбран  $256 \times 256$  отсчетов, соответственно область ввода ограничена квадратом  $6,25 \times 6,25$  мм<sup>2</sup> при общих размерах подложки  $24 \times 32$  мм<sup>2</sup>. Таким образом, обработка всей подложки осуществляется за 20 кадров.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к алгоритмам в системе, является реализация их в реальном масштабе времени,

т. е. в соответствии со скоростью изготовления подложек ГИС. Программное обеспечение для контроля пассивных слоев ГИС построено по модульному принципу, написано на языке макро-Ассемблер, занимаемый объем оперативной памяти составляет 32 Кбайта.

Основные технические характеристики системы  
для контроля счетных трафаретов:

Количество отсчетов в кадре	256×256
Количество уровней яркости	256
Размер контролируемого трафарета, мм <sup>2</sup>	24×36
Разрешающая способность, мкм	5
Время контроля одного трафарета (при средней насыщенности топологии), мин	20
Надежность выделения дефектов, %	97

Технические характеристики системы  
для контроля пассивных слоев ГИС:

Производительность, подложек/ч	180
Размер вводимого кадра, мм <sup>2</sup>	6,25×6,25
Количество отсчетов в кадре	256×256
Количество уровней яркости	256
Время ввода и контроля одного кадра, с	1
Время обработки одной ГИС, с	20
Разрешающая способность, мкм	20
Надежность выделения дефектов, %	97

Типы контролируемых дефектов – разрыв, локальное сужение и расширение, общее смещение проводникового слоя, короткое замыкание. Система технического зрения для контроля ПП может быть реализована в виде специализированных вычислительных устройств. Варианты реализации таких систем приведены ниже.

Система технического зрения содержит ТК, располагаемую над контролируемой поверхностью, вычислительный блок, обрабатывающий получаемые ТК изображения и видеоконтрольное устройство, используемое в основном при настройке системы. Контроль печатных плат и фотошаблонов выполняется путем механического сканирования контролируемой поверхности и анализа получаемых изображений. Для сканирования используется автоматически перемещающийся КС, на котором укрепляется контролируемая деталь (печатная плата или фотошаблон). Эталонами при контроле могут служить программа построе-

ния фотошаблона, предназначенная для фотопостроителя, а также проверенные вручную фотошаблоны и печатные платы. После автоматического просмотра контролируемой детали СТЗ выдает оператору информацию о недопустимых отклонениях оси печатного проводника, ширина проводника, отклонениях диаметров и смещениях центров контактных площадок, о недопустимом сближении или смыкании соседних проводников, местных утоньшениях или увеличениях ширины проводника, разрыве проводника, о раковинах и наплывах на контактных площадках, наличии непротравленных участков на печатной плате, посторонних вкраплениях на эмульсии фотошаблона и степени черноты проводников фотошаблона.

Допустимые значения перечисленных дефектов задаются оператором при настройке СТЗ. Анализируя список дефектов, оператор принимает решение о годности контролируемой детали. Решение о годности детали также может принимать СТЗ при работе полностью в автоматическом режиме. Параметры системы приведены в табл. 6.2

Таблица 6.2

*Технические параметры специализированных СТЗ*

Наименование параметра	Конфигурация системы		
	тип 1	тип 2	тип 3
Видеокамера			
Количество	1	2	2
Тип фотоприемника видеокамеры	матрица МФ-14	матрица МФ-14	линейка ЛФ-102
Применяемый объектив	«Индустар 50-2» с удлинительными кольцами		
	доработанный		без доработки
Разрешающая способность	1/32 поля обзора		1/1024 поля обзора
Угловое поле зрения, град	30		22
Диапазон освещенности объекта, лк	150...2000		
Габаритные размеры камеры, мм <sup>3</sup>	120×50×80		50×60×70
Масса, кг	0,3		0,2
Вычислительный блок			
Тип микропроцессора	КР 580	КР580	1816ВЕ35 2 шт.
Емкость энергонезависимого ОЗУ процессора, Кбайт	4	4	128 байт
Емкость ПЗУ процессора, Кбайт	8	8	8



Наименование параметра	Конфигурация системы		
	тип 1	тип 2	тип 3
Минимальный базовый комплект плат:			
процессора	+	+	–
ввода изображения	+	+	–
вывода на ВКУ	+	+	–
обработки изображения и управления ВУ	–	–	–
индикации и интерфейсов	–	–	+
Дополнительный набор плат для отладки и расширения системы платы:			
энергонезависимого ОЗУ – 16 Кбайт	+	+	+
ППЗУ-16 Кбайт	+	+	+
процессора	+	+	+
Программное обеспечение	специальное сервисное, библиотека подпрограмм обработки изображений		
Время обработки кадра, с	0,05...0,5		
Наличие интерфейсов технологического оборудования	+	+	+
Габаритные размеры блока, мм	336×323×100		
Масса блока, кг	не более 7,5		
Питание	220 В; 50 Гц; 40 Вт		
Видеоконтрольное устройство тип ВКУ	«Электроника МС 6105.01»		

#### **6.6.4. Телевизионные системы технического зрения для контроля и поверки стрелочных индикаторных устройств**

Системы технического зрения в основном строятся на основе передающих трубок мгновенного действия типа диссектор. Используемая в СТЗ произвольная выборка сигналов позволяет применять в адаптивных диссекторных СТЗ любые реализованные программно или аппаратно алгоритмы считывания информации, изменяемые в процессе работы системы.

Так, например, в СТЗ могут применяться поиск объекта в широком угле зрения большим растром и измерение характеристик обнаруженного объекта более точным малым растром, центр которого совмещается с центром объекта, изменение разрешающей способности системы масштабированием растров пропорционально полю зрения и размерам объектов, слежение малым растром за центром подвижного объекта, а также по контуру изображения объекта и другие режимы работы и способы считывания информации.

Аналогичные алгоритмы считывания информации используются в зрении человека. Производится слежение глазом за подвижным объектом, выделяются контуры и границы изображений объектов. Сначала производится грубое обнаружение объекта в поле зрения, а затем изображение объекта или его части, которую необходимо проанализировать и рассмотреть более подробно, направляется на центральное углубление счетчика, где острота зрения и разрешающая способность максимальны.

Рассмотрим примеры практической реализации диссекторных СТЗ со специальными развертками и алгоритмами анализа изображений объектов, позволяющими произвести обработку сигналов простыми устройствами, работающими в реальном масштабе времени и не требующими применения специальных ЭВМ, а также больших аппаратных и временных затрат для обработки видеоинформации.

Система технического зрения содержит следующие блоки: блок трубки, преобразующий оптическое изображение объекта в электрический сигнал; обработки видеосигнала, выделяющий полезный сигнал из шумов и помех окружающего фона и преобразующий видеосигнал в бинарный; обнаружения и измерения координат объектов; цифровых разверток, формирующих напряжения и токи для отклоняющих катушек диссекторов; обработки информации; управления, задающий режимы работы системы; высоковольтного и низковольтного напряжения питания.

Блок обработки видеосигналов содержит фильтр с узкой полосой пропускания, оптимальной для обнаружения видеосигнала, выходное решающее устройство и схему формирования порогового уровня обнаружителя сигналов. На блок обработки с выхода блока трубки поступает видеосигнал, амплитуда которого пропорциональна освещенности объекта и окружающего его фона. Видеосигнал усиливается, интегрируется на время длительности сигнала, фильтруется и сравнивается в решающем устройстве с пороговым уровнем.

Схема формирования порогового уровня построена по принципу преобразования амплитуды видеосигнала в постоянное напряжение, часть которого, например, равная половине амплитуды видеосигнала, используется в качестве порогового уровня. Запоминание уровня производится в режиме обучения или калибровки СТЗ. Если видеосигнал превышает уровень порогового устройства, то он преобразуется в цифровой бинарный сигнал и принимается решение об обнаружении объекта. Для исключения повторных обнаружений сигналов на одной строке в решающем устройстве применяется триггер с отдельным запуском от импульсов генератора развертки и от первого сигнала, обнаруженного на строке.

Таким образом, на выходе блока обработки видеосигнала формируется узкополосный сигнал в виде пачки импульсов, число которых про-

порционально размерам изображения объекта в направлении кадровой развертки или проекции изображения объекта на ось  $Y$ .

Габаритные размеры изображений объектов определяются подсчетом числа импульсов в пачке за один период кадровой развертки. Полный цикл обнаружения и измерения координат объектов по осям  $Y$  и  $X$  равен четырем периодам кадровой развертки.

В первом кадре при сканировании кадровой развертки по оси  $Y$  число импульсов, поступающих с выхода блока обработки, делится на два и суммируется реверсивным счетчиком. Во втором кадре на вычитающий вход реверсивного счетчика подается пачка обнаруженных сигналов без деления на два. Накопленное в первом кадре число импульсов при вычитании во втором кадре уменьшается и становится равным нулю в центре изображения объекта.

В момент обнуления и переполнения реверсивного счетчика на его выходе формируется импульс, который поступает на управляющие входы выходных регистров и записывает в регистры координату центра изображения объекта с выходов счетчиков цифровой кадровой развертки. Затем направление сканирования изменяется на  $90^\circ$  и при повороте раstra на  $90^\circ$  в третьем и четвертом периодах кадровой развертки определяются так же, как и по оси  $Y$ , размеры и координаты центра изображения объекта по оси  $X$ . Координаты центра записываются в выходные регистры координат центра изображения объекта по оси  $X$ . После обнаружения объектов в четырех кадрах сигналы остановки, поступая на управляющие входы счетчиков развертки, записывают в них с выходных регистров координаты центров изображения объектов по осям  $Y$  и  $X$ . Координаты центра объекта преобразуются в ЦАП в постоянные напряжения и через выходные усилители подаются на отклоняющие катушки трубки. Развертка останавливается в центре изображения объекта. Автоматически включается измерительный вращающийся растр, центр которого совмещается с центром изображения объекта, – СТЗ переходит в режим измерения.

Формирователь вращающегося раstra состоит из следующих функциональных узлов: цифрового генератора функций, генератора строчной развертки, генератора кадровой развертки, сумматоров и выходных усилителей развертки. Цифровой генератор функций формирует синусные и косинусные напряжения. Для этого тактовая частота задающего генератора (рис. 6.38) поступает через блок управления на вход адресного счетчика, подсоединенного ко входам программируемых постоянных запоминающих устройств, в которых записаны синусоидальный ППЗУ1 и косинусоидальный ППЗУ2 цифровые коды, которые преобразуются ЦАП1 и ЦАП2 в аналоговые синусные и косинусные

напряжения, поступающие в качестве опорных напряжений на формирователи строчных и кадровых напряжений развертки.

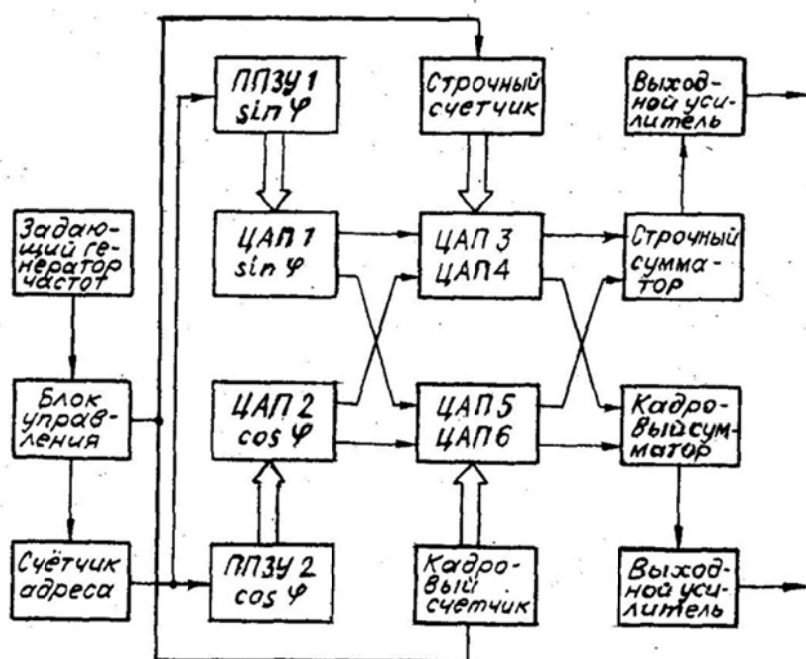


Рис. 6.38

Строчные напряжения имеют треугольную форму, а кадровые – пилообразную. Для формирования строчных напряжений развертки частота элемента через блок управления поступает на входы реверсивного строчного счетчика. Параллельный двоичный код подается с выходов счетчика на преобразователи, ЦАП3 и ЦАП4 синусного и косинусного каналов строчной развертки, представляющих собой перемножающие устройства треугольных напряжений развертки на синусные и косинусные опорные напряжения.

Модулированные синусные и косинусные напряжения строчной развертки суммируются с аналогично сформированными модулированными пилообразными напряжениями кадровой развертки и через выходные усилители поступают на строчные и кадровые отклоняющие катушки диссектора. Таким образом, на фотокатод диссектора формируется измерительный растр. Его положение по углу поворота определяется цифровым кодом на выходе адресного счетчика. Если код изменяется, то растр неподвижен и расположен под определенным заданным этим кодом углом к осям координат. Если код изменяется, то растр вращается. Скорость вращения определяется тактовой частотой на выходе адресного счетчика, а число положений по углу поворота – разрядностью адресного счетчика, подключенного к ЦАП1 и ЦАП2.

Размеры растра определяются величиной опорных напряжений ЦАП1 и ЦАП2. Если опорные напряжения формируются ЦАП, подключенным к счетчикам размеров, то растр выбирается пропорциональным размерам изображения объектов. Если отключаются строчные или кадровые каналы формирования синусных и косинусных напряжений разверток, то на фотокатоде формируется диаметрально-круговая развертка с частотой кадров или строк в виде одной строки, вращаемой вокруг центра изображения объекта. При такой развертке размеры объекта определяются относительно центра изображения объекта.

Однако в отличие от вращаемого растра, инвариантного к смещению объекта, в диаметрально-круговой развертке для определения размеров и формы необходимо слежение и точное совмещение центров развертки и подвижного изображения объекта. Если отключены строчные и кадровые синусные и косинусные каналы, то на фотокатоде формируется наиболее простая развертка в виде окружности.

Цикл считывания информации малым измерительным растром соответствует повороту развертки на  $180^\circ$ , разделенному, например, на 16 одинаковых углов, определяющих положение строки или растра по углу поворота и напряжению сканирования строчной или кадровой развертки. Габаритные размеры пропорциональны в однострочном режиме числу элементов, а в растровом – числу строк, в которых обнаружен сигнал. Эти размеры определяются счетчиком входных сигналов и записываются в рабочем режиме в ОЗУ или в режиме обучения в ППЗУ и в выходные регистры размеров объектов. После записи в ОЗУ всех 16 габаритных размеров производится их считывание в порядке возрастания. Первый – минимальный размер и последний – максимальный размер записываются и запоминаются в параллельном двоичном коде в выходных регистрах максимального и минимального размеров. Одновременно фиксируются углы, соответствующие всем размерам. Углы, под которыми расположены максимальный и минимальный размеры, определяющие положение объекта по углу поворота, запоминаются в выходных регистрах ориентации объекта по углу поворота.

Координаты центра изображения объекта для вращающегося растра измеряются путем подсчета числа строк от начала растра до половины размера изображения объекта. В прямоугольной системе координат эти измерения производятся при сканировании кадровой развертки в вертикальном и горизонтальном направлениях, а в полярной системе координаты определяются для любого из 16 направлений сканирования с одновременным фиксированием угла наклона размера детали. Координаты центра записываются в выходные регистры координат центра объекта в режиме измерения.

Приближенная форма объекта оценивается по отношению максимального размера к минимальному. Для более точной идентификации в режиме обучения в ППЗУ записываются габаритные размеры эталонных объектов по 16 направлениям сканирования. При идентификации в режиме быстрого считывания информации сравниваются по порядку записи 16 размеров анализируемого объекта, запомненных в ОЗУ, с размерами эталонных объектов, запомненных в ППЗУ.

Число совпавших размеров подсчитывается и сравнивается с пороговым уровнем решающего устройства, выбранным в режиме обучения. Если порог превышает, то объекты считаются идентичными. Если положение анализируемого объекта по углу поворота не совпадает с положением эталонного объекта, то изменяется начало считывания информации по углу поворота в ОЗУ, т. е. вращение изображения объекта в ОЗУ до совпадения его с положением эталонного объекта в ППЗУ. Число эталонных объектов определяется числом плат с ППЗУ. Анализируемый объект, запомненный в ОЗУ, сравнивается в параллельных каналах одновременно со всеми эталонными объектами, запомненными в режиме обучения в ППЗУ.

Система технического зрения работает в режиме обучения и в рабочем режиме. В режиме обучения в поле зрения СТЗ помещается эталонный объект. Производится автоматическое обнаружение объекта и измерение его координат. Затем растр обнаружения автоматически отключается, включается измерительный растр, центр которого совмещается с центром изображения объекта. В выбранное ППЗУ записываются габаритные размеры эталонного объекта и порядок их следования по углу поворота.

В рабочем режиме производятся автоматическое включение растра обнаружения, измерение габаритных размеров объекта по двум осям координат, определение координат центра объекта, выключение растра обнаружения, включение растра измерения, совмещение центров измерительного растра и объекта, определение габаритных размеров объекта по всем углам поворота растра, запись в ОЗУ, уточнение координат центра объекта, определение максимального и минимального размеров объекта и его ориентации, сравнение габаритных размеров объектов, записанных в ОЗУ и ППЗУ, и идентификация объектов по форме. Считывание и обработка информации об анализируемом объекте производятся одновременно с обнаружением и определением координат следующего объекта. Работа в параллельных режимах обнаружения и измерения координат объектов, одновременного сравнения по форме анализируемого и эталонного объектов повышает быстродействие СТЗ.

Основные технические характеристики СТЗ. Число строк в режиме обнаружения  $128 \times 128$ , в режиме измерения –  $64 \times 64$ . Точность опреде-

ления координат в режиме обнаружения 2 %, в режиме измерения – 0,5 %. Освещенность объекта 50...1000 лк. Минимальный контраст изображения объекта 0,5. Число уровней видеосигнала 2. СТЗ выполнена в виде трех блоков: блока трубки длиной 280 мм и диаметром 70 мм, электронного блока обработки информации с габаритными размерами 310×280×135 мм<sup>3</sup>, и блока питания 340×280×125 мм<sup>3</sup>. Потребляемая мощность блока трубки 4 Вт, электронного блока – 28 Вт, масса блока трубки 1,2 кг, электронного блока – 5 кг.

Модульный принцип компоновки аппаратных средств позволяет обеспечить гибкость и универсальность СТЗ и отказаться при обработке видеoinформации от специальной ЭВМ.

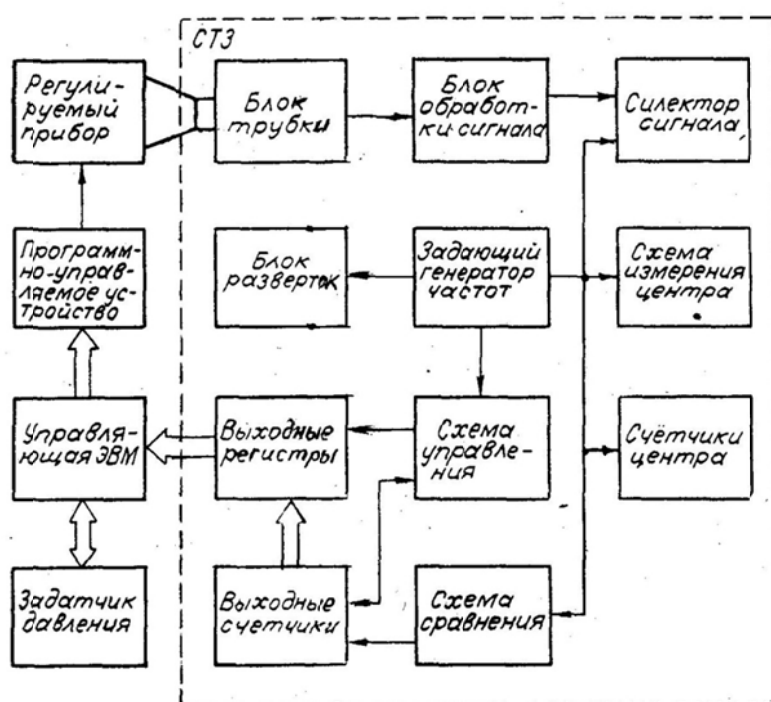


Рис. 6.39. Автоматический задатчик давления в автоматизированных комплексах

Сравнительно простой алгоритм считывания и обработки информации реализован в автоматизированных комплексах, предназначенных для регулировки и поверки приборов давления. Комплекс содержит автоматический задатчик давления (рис. 6.39), диссекторную СТЗ с круговой разверткой, управляющую ЭВМ и программно-управляемое исполнительное устройство. По сигналу управляющей ЭВМ в соответствии с алгоритмом регулировки или поверки датчик давления задает ступенчатый или непрерывный режим нагружения приборов. При регулировке задатчик давления по программе обеспечивает ступенчатое приращение

давления, подаваемого на прибор. СТЗ регистрирует приращение угла поворота указательной стрелки, соответствующее заданному приращению давления.

Информация с выхода СТЗ и задатчика поступает в управляющую ЭВМ, обрабатывается и с ее выхода подается на исполнительное устройство для изменения регулируемых параметров прибора. При поверке задается одинаковое давление на поверяемый и эталонный приборы. СТЗ определяет угловое положение указательных стрелок приборов и их взаимное отклонение. Информация об отклонении поступает через ЭВМ в управляющее исполнительное устройство.

Для повышения точности применяется коррекция искажений при помощи периодической калибровки системы эталонными тестами. В таком случае вместо измеряемого объекта на фотокатод трубки проецируется изображение координатной сетки или реперных меток, а координаты и размеры изображения объекта определяются не относительно импульсов развертки, а относительно временного положения сигналов от реперных меток. Такая калибровка позволяет уменьшить как систематические, так и низкочастотные случайные искажения, если интервал их корреляции значительно превышает интервал прерывания рабочего режима измерения и калибровки системы по тестам.

Период последовательных циклов калибровки уменьшится, а точность повысится, если для введения теста использовать часть поля зрения СТЗ, а в качестве теста использовать эталонный объект, аналогичный измеряемому, и применить дифференциальный метод измерения.

В СТЗ для поверки манометров используются коррекция искажений при помощи эталонного манометра и дифференциальный метод измерения положения указательной стрелки. Изображения шкалы и стрелки поверяемого и эталонного приборов проецируется через полупрозрачное зеркало на фотокатод диссектора. Для увеличения контраста изображений стрелок используется осветительное устройство. Приборы помещаются в поле зрения системы таким образом, чтобы изображения центров шкал совпадали, а изображения стрелок были по первому варианту смещены относительно друг друга по углу поворота, а по второму варианту совпадали друг с другом по углу поворота при одинаковом давлении.

Для упрощения селекции сигналов и обработки информации используются отрицательный контраст изображения стрелки поверяемого прибора и положительный контраст для эталонного прибора и соответственно разнополярный сигнал на выходе диссектора.

Для первого варианта расположения указательных стрелок измерение и сравнение угловых положений стрелок производятся за один период сканирования апертуры по окружности, а для второго варианта –



за два периода, в каждом из которых измеряется размер окружности. В первом периоде определяется угловое положение стрелки эталонного прибора, а во втором – рабочего.

Структурная схема СТЗ содержит блок трубки, блок обработки видеосигнала, блок цифровых разверток, селекторы сигнала по длительности, схемы измерения центров сигналов, фазлируемые счетчики центров, схемы сравнения временного положения центров сигналов, выходные суммирующие счетчики центров сигналов, выходные регистры, задающий генератор тактовых и управляющих импульсов и схемы управления выходными счетчиками и регистрами.

Для считывания информации о положении стрелки применяется цифровая развертка в виде окружности, размер и положение которой выбираются такими, чтобы отсутствовали сигналы помех от цифр, делений и других знаков шкалы, и производилось двукратное сканирование изображения стрелок за один период, не требующее точного совмещения центров шкалы и развертки. Применение цифровых разверток позволяет автоматически изменять размер, положение и частоту развертки.

Изображение стрелки приводится к двухградационному, силуэтному для чего сигнал, полученный при сканировании апертуры луча по изображению стрелки, поступает с выхода трубки в блок обработки видеосигнала, фильтруется, сравнивается с автоматически регулируемым порогом и преобразуется в бинарный сигнал.

За один период развертки с выхода блока обработки поступают импульсы с длительностью, пропорциональной узкой и широкой частям стрелки. Импульсы селекционируются по длительности и разделяются по одинаковым параллельным каналам обработки сигнала от узкой и широкой частей стрелки. Параллельная обработка информации в четырех параллельных каналах повышает быстродействие системы. В каждом из каналов определяются центры сигналов, т. е. центры изображений стрелок поверяемого и эталонного приборов.

Для определения углового положения стрелок импульсы центров поступают на управляющие входы фазлируемых счетчиков и преобразуются в прямоугольные периодические импульсы со скважностью, равной двум. Временное положение фронтов этих импульсов, непрерывно поступающих с выходов параллельных каналов, соответствует положению узкой и широкой частей стрелок и заданному давлению.

Сигналы с выходов фазлируемых счетчиков сравниваются схемами совпадения, и на их выходе формируются импульсы, длительность которых пропорциональна отклонению стрелки поверяемого прибора относительно эталонного. При регулировке приборов длительность им-

пульсов пропорциональна отклонению стрелки регулируемого прибора относительно своего предыдущего положения.

Сигналы с выходов схем совпадения заполняются импульсами тактовой частоты и преобразуются в пачку импульсов. Суммирующими выходными счетчиками определяется число импульсов в пачках за один или несколько периодов развертки, составляющих цикл измерения. В конце каждого цикла информация, полученная на выходе счетчиков, записывается в выходные регистры, где запоминается и непрерывно выдается в виде цифрового двоичного кода на управляющую ЭВМ, а после обработки – на программно-управляемое исполнительное устройство.

Конструктивно СТЗ выполнена в виде блока трубки диаметром 70 мм и длиной 230 мм, включающего в себя объектив и трубку с отклоняюще-фокусирующей системой, электронного блока обработки информации, состоящего из трех плат размером  $120 \times 280$  мм<sup>2</sup>, собранных из сменных узлов, обеспечивающих гибкость системы и стандартных блоков низковольтного питания. Общая мощность, потребляемая блоком трубки и электронным блоком, 30 Вт. Освещенность приборов 500...1000 лк, минимальный контраст стрелок 0,7, количество градаций яркости 2, максимальная частота считывания информации 1 кГц, предельная точность измерения 0,1 %, частота выдачи информации 10...40 Гц.

#### **6.6.5. Помехоустойчивые системы технического зрения роботехнического гибкого производственного модуля сварки**

Практически во всех отраслях промышленности широко используется электродуговая сварка. Технологические операции с применением электродуговой сварки являются одним из самых трудоемких и при этом наименее механизированы и автоматизированы. Кроме того, они представляют значительный вред для человеческого организма, так как при сварке разбрызгивается расплавленный металл, выделяются вредные газы, появляются ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, а также опасность поражения электрическим током. Поэтому задача разработки сварочных роботов является весьма актуальной и ее решение при серийных выпусках и применениях таких роботов позволит высвободить большие трудовые ресурсы, повысить производительность труда, исключить сменность и т. д.

Для массового использования сварочных роботов необходимо их оснастить устройствами очувствления СТЗ, с помощью которых вырабатываются сигналы управления, корректирующие положение сварочной горелки. В результате робот приобретает возможность адаптации к отклонениям стыка непосредственно в процессе сварки. Кроме геометрической адаптации с помощью СТЗ можно также обеспечить опти-

мальное управление такими параметрами, как скорость подачи присадочной проволоки, ток и напряжение дуги, и определить качество получаемого шва.

Специфика электродуговой сварки такова, что в процессе ее появляются интенсивные электромагнитные и световые помехи. Поэтому СТЗ адаптивного робота должна иметь требуемую точность измерений положения и размера стыка при воздействии помех, т. е. высокую помехоустойчивость. Известны единицы адаптивных сварочных роботов, среди которых наиболее полно описан сварочный робот японской фирмы Mitsui, СТЗ которого выполнена на основе фотоприемной матрицы ПЗС. Вследствие того, что ПЗС является фотоприемником с накоплением зарядов и имеет малый динамический диапазон, разработчикам пришлось применить в качестве осветителя мощные ксеноновые лампы и инфракрасные фильтры в оптической системе. Поэтому СТЗ используется на крупногабаритном роботе, предназначенном для сварки корпусов кораблей, и имеет ограниченное применение.

На основе известных помехоустойчивых методов выделения и обработки сигнала разработаны СТЗ ОСС-2 и ОСС-3 на основе а) интегральной МДП-фотодиодной матрицы, б) полупроводникового сканстора и в) интегральной МДП-фотодиодной линейки.

Система технического зрения ОСС-2 имеет широкие функциональные возможности, увеличенное поле зрения и более простую и малогабаритную оптическую систему. Это обеспечивается использованием интегральной МДП-фотодиодной матрицы в режиме прямого детектирования с соответствующим получением и обработкой сигнала.

Функциональная схема ОСС-2 приведена на рис. 6.40. Оптическая система состоит из осветителя 7 и приемной оптикоэлектронной головки (ОЭГ) 2, оснащенных объективами 3, 4. В ОЭГ размещены инфракрасный светофильтр 5, интегральная фотоматрица (ИФМ) 6, блоки выделения и предварительной линейной обработки сигнала.

Работа сенсора синхронизируется задающим генератором (ЗГ). Светодиоды 7 осветителя включены параллельно и запитываются через коммутатор (К) импульсным током со скважностью 2 и частотой 80 кГц. За время опроса одной фотоячейки ИФМ производится 8 включений светодиодов, что задается делителем частоты (ДЧ1). С помощью ДЧ2, ДЧ3 формируются импульсы управления дешифраторами по столбцам и строкам (ДШ1, ДШ2), которые, в свою очередь, управляют разверткой ИФМ и аналоговым коммутатором (АК). Выходной ток ячеек ИФМ последовательно по строкам подается на активный полосовой преобразователь тока (ППТ). Далее выделенный сигнал перемножается с тактовыми импульсами со сдвигом фазы на  $180^\circ$  в перемножителях

(П1 и П2), выходные сигналы которых вычитаются. Это производится для корреляционной фильтрации полезного сигнала, подавления остатков геометрического шума и сигналов от световых помех дуги. Для компенсации фазового набега в компараторе (Кр) и светодиодах, ИФМ, АК, ППТ используются фазовращатель (Ф). Разностный сигнал подается на интегратор со сбросом, где производится накопление 8 тактов сигнала за время опроса фотоячейки, что дополнительно повышает отношение сигнал-шум примерно в 3 раза. Затем выделяется огибающая отфильтрованного сигнала БВО и ФНЧ. Полоса пропускания ФНЧ выбирается минимальной, исходя из допустимых динамических искажений. Полученный видеосигнал через АЦП и интерфейсный блок сопряжения вводится в ЭВМ «Электроника 60» куда также подаются необходимые тактовые и синхронизирующие импульсы.

Координаты границ выделяются адаптивной нелинейной обработкой компарирования со следящим порогом, устанавливаемым амплитудным детектором (АД). С выхода компаратора снимается последовательность прямоугольных импульсов. Длительность каждого импульса соответствует ширине стыка по соответствующей строке, а временной интервал от начала опроса каждой строки до центра импульса – координате стыка. Координата центра стыка в аналоговой форме выделяется в соответствующем блоке БВКЦ. С помощью этого сигнала можно непосредственно управлять электроприводом сварочного робота. ЭВМ с интерфейсным блоком управления и АЦП входят в состав системы управления сварочным роботом (СУСР). Поле зрения ОСС-2 позволяет повысить точность определения траектории стыка и оптимально ее отслеживать при большей крутизне изгиба.

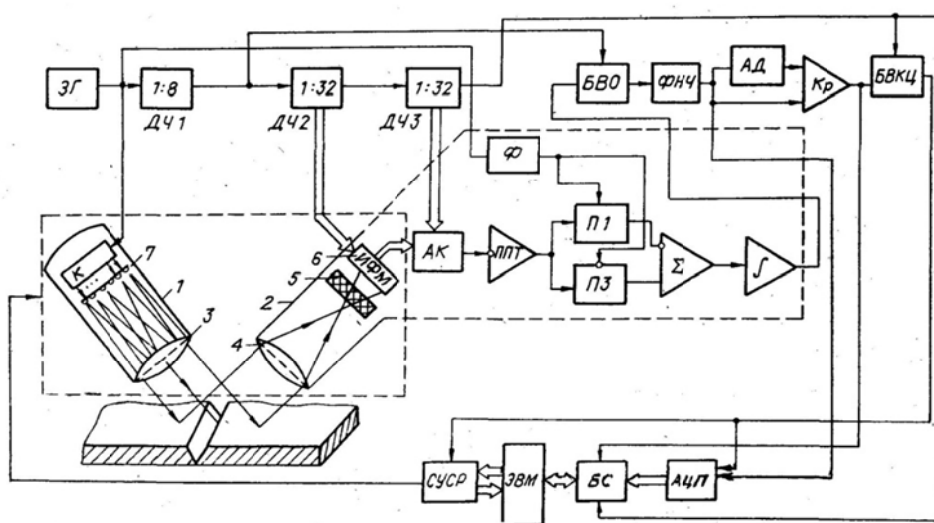


Рис. 6.40. Функциональная схема оптоэлектронного сенсора ОСС-2

### Основные технические характеристики

Поле зрения, мм <sup>2</sup>	30×30
Среднеквадратическая погрешность измерения координат стыка по полю, %	0,5
Расстояние от оптической системы до плоскости свариваемых изделий, мм	50...300
Минимальное расстояние между сварочной ванной и полем контроля, мм	40
Минимальная ширина зазора между свариваемыми изделиями, мм	1
Быстродействие, кадр/с	10
Габаритные размеры:	
оптической системы с оптоэлектронной головкой и осветителем, мм <sup>3</sup>	100×250×50
электронного блока, мм <sup>3</sup>	200×150×200
Масса:	
оптической системы, кг	1
электронного блока, кг	1,5

Осветитель выполнен в виде матрицы из 14 светодиодов АЛ107 с проекционным объективом; фотоприемник СТЗ – интегральная МДП-фотодиодная матрица МФ-14 (ФПУ-14); выход СТЗ стыкуется с микроЭВМ «Электроника 60», где производится дальнейшая цифровая обработка информации и вырабатываются сигналы управления сварочным роботом.

Система технического зрения ОСС-3 выполнена на основе полупроводникового сканистора и имеет более простую и малогабаритную оптическую систему. Кроме того, она обладает высокой разрешающей способностью по координате и предпочтительна для использования в малогабаритных сварочных робототехнических системах.

Функциональная схема ОСС-3 приведена на рис. 6.41. Осветитель 1 содержит линейку светодиодов 2 и объектив 3. Оптоэлектронная головка имеет объектив 4, светофильтр 5, цилиндрическую линзу 6, сканистор 7 и блоки выделения и предварительной линейной обработки сигнала. Цилиндрическая линза 6 установлена параллельно светочувствительной поверхности.

Синхронизация СТЗ осуществляется задающим генератором. Коммутатор записывает одновременно все светодиоды импульсным током со скважностью 8 и частотой 75 кГц. Генератор пилообразного напряжения (ГПН) вырабатывает линейно нарастающее напряжение для коммутации сканистором 7, коллектор которого подключен ко входу полосового ак-

тивного преобразователя тока (ПТТ). С выхода ПТТ усиленный и частично отфильтрованный сигнал подается на дискретно дифференцирующий фильтр (ДДФ), в котором производится корреляционная фильтрация низкочастотных составляющих фототока, пропорциональных световым помехам. С выхода ПТТ низкочастотные составляющие фототока через ФНЧ1 подаются на ГПН для коррекции напряжения коммутации сканистора с целью компенсации влияния световой помехи.

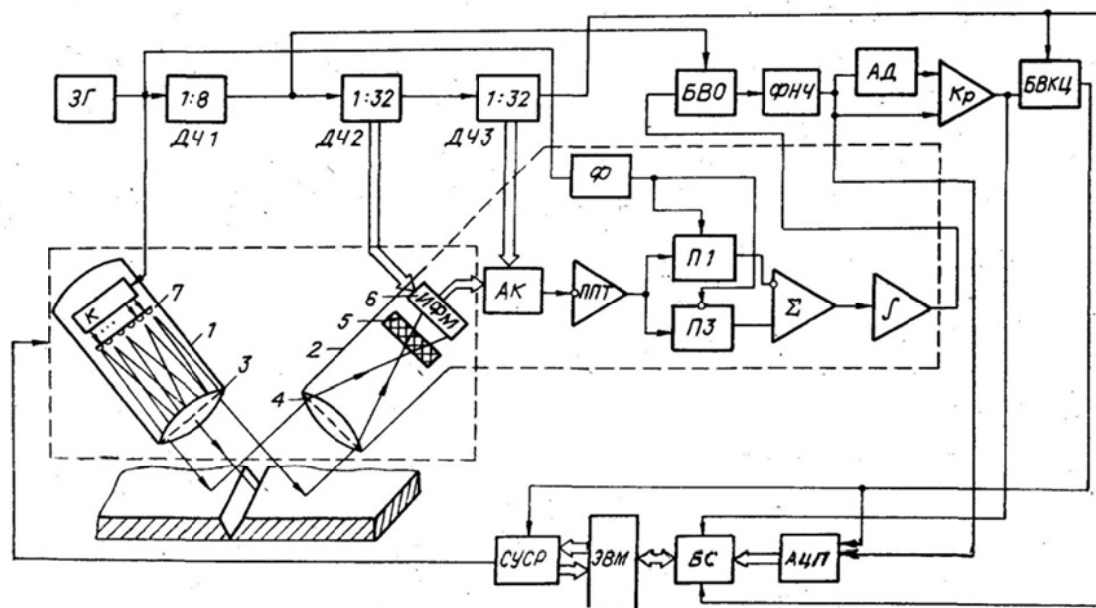


Рис. 6.41. Функциональная схема оптоэлектронного сенсора ОСС-3

Полезный высокочастотный сигнал обрабатывается в дискретно интегрирующем фильтре (ДИФ), где проводится корреляционная фильтрация высокочастотных составляющих и выделяется огибающая фототока. Полоса частот сигнала дополнительно ограничивается фильтром нижних частот (ФНЧ2). Для получения видеосигнала производится дифференцирование огибающей фотопотока. Информационный сигнал, соответствующий размерам и положению импульса, длительность и временное положение которого пропорциональны стыку, формируется нелинейной обработкой видеосигнала, компарированием со следящим порогом. Для повышения точности обработки производится переключение постоянной времени амплитудного детектора выходным сигналом компаратора. Координата центра стыка в аналоговой форме выделяется в блоке БВКЦ. Этот сигнал через АЦП и интерфейсный блок сопряжения вводится в ЭВМ «Электроника 60» и также может подаваться на электропривод сварочного робота. ЭВМ, БС, АЦП входят в состав СУСР.

### Основные технические характеристики

Поле зрения, мм <sup>2</sup>	30×2
Разрешающая способность по координате, %	0,05
Расстояние от оптической системы до плоскости свариваемых изделий, мм	50
Минимальная ширина зазора между свариваемыми изделиями, мм	0,5
Минимальное расстояние между сварочной ванной и полем контроля, мм	30
Быстродействие, изм/с	50
Габаритные размеры:	
оптической системы с оптоэлектронной головкой и осветителем, мм <sup>3</sup>	80×100×50
электронного блока, мм <sup>3</sup>	140×80×140
Масса:	
оптической системы, кг	0,3
электронного блока, кг	1

Осветитель выполнен в виде линейки из 8 светодиодов АЛ107 с проекционным объективом. Фотоприемник СТЗ – полупроводниковый сканистор. Выход СТЗ стыкуется с микроЭВМ «Электроника 60», где проводится дальнейшая цифровая обработка информации и вырабатываются сигналы управления сварочным роботом.

Система технического зрения ИРТ-1 предназначена для определения размера и положения поперечного сечения сварочной зоны и ее температуры в процессе электродуговой сварки и состоит из электронного блока и малогабаритной выносной оптоэлектронной головки, которая устанавливается вместе со сварочной горелкой. Система содержит выносную малогабаритную оптоэлектронную головку (ОЭГ) и электронный блок (ЭБ) (рис. 6.42). ОЭГ закрепляется на сварочной горелке 1 так, чтобы в ее поле зрения попадало поперечное сечение сварочной ванны вблизи места подачи сварочной проволоки 3, и состоит из малогабаритного объектива 4, инфракрасных светофильтров 5, интегральной МДП-фотодиодной линейки 6 типа ЛФ-1024 и полосового преобразователя тока (ППТ). ОЭГ соединена с блоком синхронизации и развертки (БС и Р) и блоком выделения и линейной обработки сигнала (БВ и ЛОС). Выделенный и отфильтрованный видеосигнал поступает на блок выделения размеров (БВР) и блок измерения температуры (БИТ), в БВР проводится нелинейная адаптивная обработка компарированием со следящими порогами, в БИТ производится адаптивное регулирование экспозиции фотолинейки и выделение информации о температуре.

Блок формирования информационных сигналов (БФИС) выделяет и масштабирует сформированные информационные сигналы в виде импульсных последовательностей. Информационные сигналы подаются на блок цифровой индикации (БЦИ), блок аналоговой индикации (БАИ) и блок сопряжения (БС). Измерение величины индицируется на цифровом табло (ЦТ) и стрелочном индикаторе (СИ). В последнем случае выдается размер отклонения измеряемой величины от номинальной устанавливаемой (УН). С выхода БС информационные параметры выдаются поочередно в виде параллельного двоичного кода на плату И2 ЭВМ типа «Электроника 60», ДВК-2, ДВК-3. При необходимости измерения, кроме границ сварочной ванны, положения ее центра и температуры, а также распределения температуры, видеосигнал преобразуется с помощью АЦП и выдается через БС на ЭВМ.

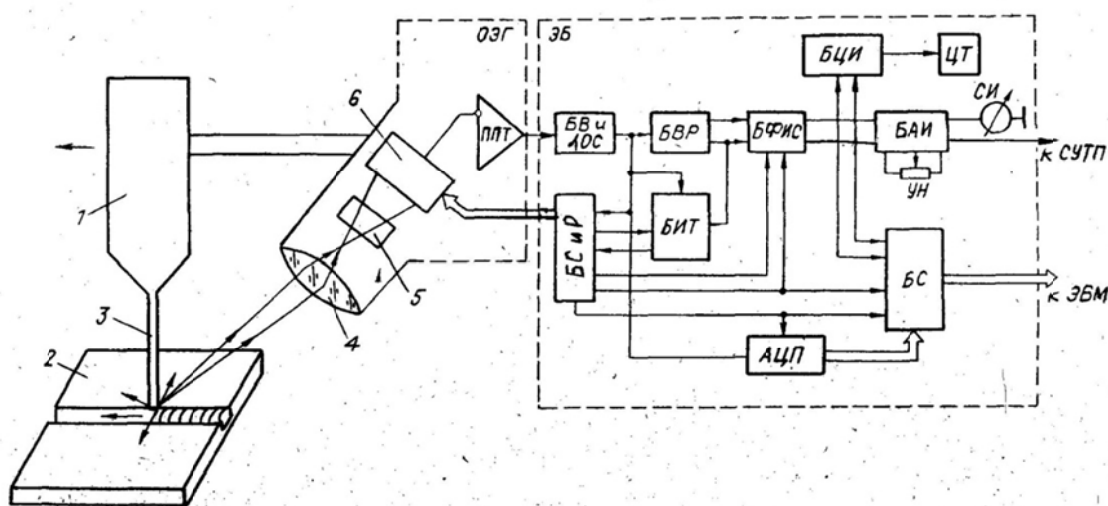


Рис. 6.42. Выносная малогабаритная оптоэлектронная головка (ОЭГ) и электронный блок (ЭБ) системы технического зрения ИРТ-1

Проведенные испытания показали весьма высокую помехоустойчивость к излучению дуги. Это, в частности, позволяет определять параметры сварочной ванны, даже когда ОЭГ располагалась впереди по ходу движения горелки.

#### Основные технические характеристики

Диапазон измерения размера и положения поперечного сечения сварочной ванны, мм	50
Среднеквадратическая погрешность измерения, %	менее 0,1
Диапазон измерения температуры, °С	600...2000
Разрешающая способность по температуре, %	0,2
Быстродействие, изм/с	250



Минимальное расстояние зоны измерения от центра дуги, мм	5
Расстояние от оптоэлектронной головки до поверхности сварочной ванны, мм	200
Габаритные размеры:	
оптоэлектронной головки, мм <sup>3</sup>	70×55×30
электронного блока, мм <sup>3</sup>	300×290×140
Масса:	
электронной головки, г	100
электронного блока, кг	5

Как уже указывалось, система имеет цифровую индикацию на 4-разрядном цифровом табло, а также аналоговую индикацию отклонения контролируемого параметра от номинального значения и соответствующие выходы. Цифровой выход представлен в виде 14-разрядного параллельного двоичного кода для подключения ЭВМ «Электроника 60», ДВК-2, ДВК-3 и др.

Проведенные испытания и использование ОСС-2, ОСС-3 и ИТР-1 в условиях реальной сварки подтвердили их высокую помехоустойчивость как к воздействиям излучения от сварочной дуги, так и к электромагнитным наводкам и помехам.

Относительная простота схемотехнического выполнения СТЗ при достаточно высоких технических характеристиках позволяют предположить перспективность их широкого применения в адаптивных робототехнических комплексах.

Прибор визуально-оптического контроля ОКС-ЗМ относится к категории устройств технологического оснащения и предназначен для получения оптического изображения объектов, содержащих интенсивно излучающие элементы (сварочная дуга, плазма и др.), его представления в комфортном виде на двух волоконно-оптических экранах. Возможно использование прибора для проведения исследований характеристик интенсивно излучающих объектов и сопутствующих физических явлений.

Прибор ОКС-ЗМ – оптическая система, осуществляющая непосредственный сбор полезной информации, содержащейся в световом потоке объекта контроля, преобразующая эту информацию к виду, удобному для ее анализа как непосредственно оператором, так и с помощью фотометрических преобразователей «свет-сигнал», например, телевизионная камера.

Применение прибора позволяет совместить операцию контроля с основным технологическим процессом, выявлять момент образования аномалий, влияющих на качество изделия (сварной шов, поверхность

металла при термообработке и т. д.), сократить затраты на ремонт готовых изделий, повысить производительность и достоверность контроля.

Устройство является несканирующим оптическим прибором, предназначенным для анализа поля объекта, содержащего интенсивные источники излучения  $\beta_{i1}$  и неизлучающие участки  $\beta_{i+1}$  информация о которых необходима для контроля и управления процессором. Контраст между элементами изображения

$$K_9 = -\frac{\beta_{i1}}{\beta_{i+1}} \text{ (см. рис. 6.43).}$$

Устройство состоит из линейного звена, формирующего оптическое изображение поля объекта с соблюдением яркостных соотношений между его элементами;  $\beta_1 = \gamma\beta_i$ . Сформированное изображение преобразуется нелинейным звеном с коэффициентом нелинейности  $L_1$  таким образом, чтобы ослабить интенсивность светового потока от излучающих элементов. После преобразования изображение увеличивается линейным звеном  $\beta_2$  и проецируется на специальные волоконно-оптические экраны с характеристикой нелинейности  $L_1$ . Выходное изображение характеризуется пониженным динамическим диапазоном яркости, позволяющим считать его стандартными телевизионными камерами.

ОКС-ЗМ обеспечивает получение изображения объекта контроля и его элементов с кратностью увеличения (масштаб) от 1,5 до 7 при расстояниях визирования от 300 до 700 мм.

Введение в состав оптической схемы прибора нелинейных преобразователей светового потока обеспечивает снижение яркостного контраста и возможность наблюдения объектов с широким диапазоном яркостей (до 10...8 кд/м). В состав ОКС-ЗМ входит комплект приспособлений и насадок, обеспечивающих вывод изображения из труднодоступной зоны.

Наличие двух выходных экранов обеспечивает одновременность непосредственного контроля оператором, ввод изображения в ЭВМ с помощью телевизионной камеры, его обработку с целью анализа возникающей аномалии и формирования управляющих воздействий. Прибор может использоваться в качестве датчика первичной оптической информации при построении систем технического зрения и управления технологическими процессами (типовая функциональная схема на рис. 6.43).

Возможность сравнения текущего изображения с эталонным, получаемым при обработке технологических режимов, исключает необходимость разработки сложных алгоритмов, учитывающих действие различных возмущений, упрощает процесс управления и автоматизации.

Интерактивный режим позволяет наиболее правильно организовать работу человеко-машинной системы, повысить качество и точность ее функционирования.

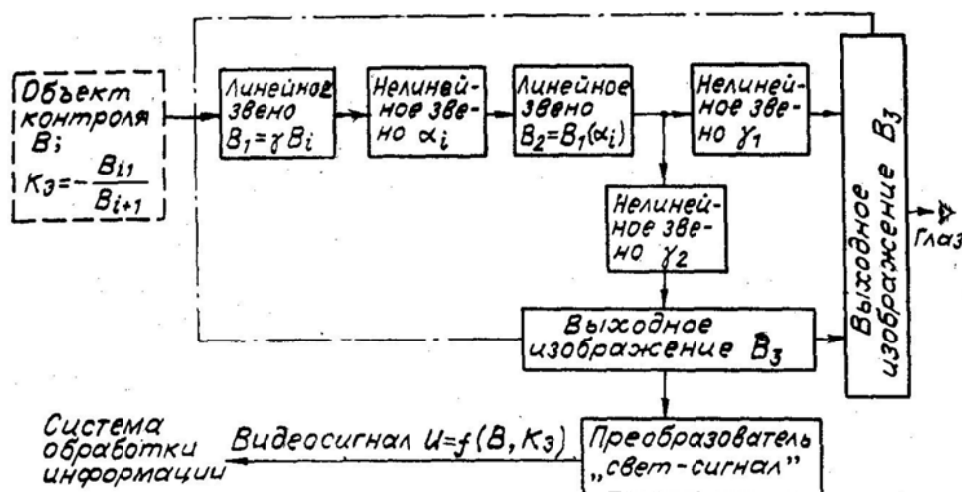


Рис. 6.43. Блок-схема устройства технологического оснащения ОКС-3М

Традиционные методы, используемые при изучении интенсивно излучающих объектов, позволяют контролировать только один из комплекса параметров, характеризующих объект. Применение прибора, выделяющего информацию о характеристиках объекта в реальном масштабе времени, позволяет выполнять многофакторный анализ его характеристик с высокой степенью достоверности.

В результате освоения 1) обеспечена возможность создания автоматизированного комплекса контроля качества формообразования сварного соединения в ходе процесса; 2) смонтирован и отлажен экспериментальный стенд для сварки образцов из тонколистовых материалов на основе станка с ЧПУ; 3) создана аппаратная основа для решения проблемы – получения сварных соединений с заданными свойствами.

Комплекс контроля качества сварных соединений в составе ОТ-10МТ с прибором визуально-оптического контроля сварки ОКС-3М на базе вычислительного комплекса ДВК-2М внедрен на Кольчугинском заводе обработки цветных металлов (Владимирская обл.).

### 6.6.6. Системы технического зрения для гибких производственных модулей механообработки

Система технического зрения «БИТ-21» для ПР-154 призвана выполнять следующие функции: определение наличия накопителя сотового типа, координат местоположения накопителя, координат местоположения деталей в накопителе, количества деталей в накопителе; идентификацию

накопителя посредством считывания кода, заданного в виде четырех цифр, деталей типа тело вращения посредством сравнения с заданным эталоном; контроль правильности установки детали в накопителе. Структурная схема СТЗ для промышленного робота представлена на рис. 6.44.

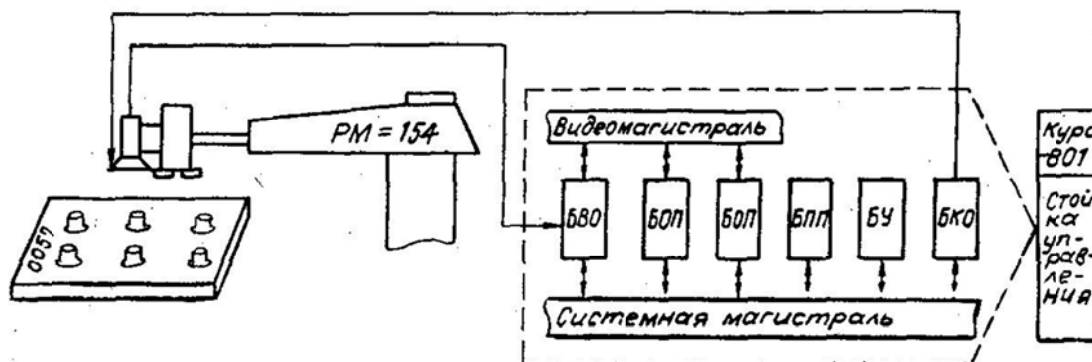


Рис. 6.44. Система технического зрения «БИТ-21» для промышленного робота РМ-154, расположенная в СУ робота

#### Технические характеристики СТЗ

Количество датчиков	1
Высота установки датчика над рабочей зоной, мм	150...300
Освещенность рабочей зоны, лк	0...2500
Объем памяти изображения, кадр	4
Погрешность определения координат	
угловых, град	0,8
линейных, %	0,7
Время обработки изображения, с/объект	не более 1

Возможны три основных варианта размещения датчика на «руке» ПР. Наиболее простым вариантом с точки зрения организации управления роботом является установка датчика непосредственно в хвате ПР (рис. 6.45, а), когда его главная оптическая ось совмещена с главной осью охвата. Такое решение является единственно приемлемым для наведения и захвата движущихся объектов. Недостаток его в том, что после охвата детали он закрывает поле обзора датчика.

Датчик может быть установлен на специальном устройстве, производящем поочередное совмещение осей датчика и охвата. В качестве такого устройства можно использовать повторный хват, в одной из позиций которого размещают датчик (рис. 6.45, б). После позиционирования по объекту устройство поворачивается и ось охвата принимает положение, в котором при позиционировании лежала ось датчика.

Третий вариант установки датчика (рис. 6.45, в) отличается наличием смещения оси датчика по отношению к оси охвата. Преимущества такой схемы очевидны при позиционировании ПР по объекту с использованием репера (специальной оптической метки), который устанавливается также со смещением относительно этого объекта. При этом не требуется использование специального охвата и снимаются ограничения на габаритные размеры датчика.

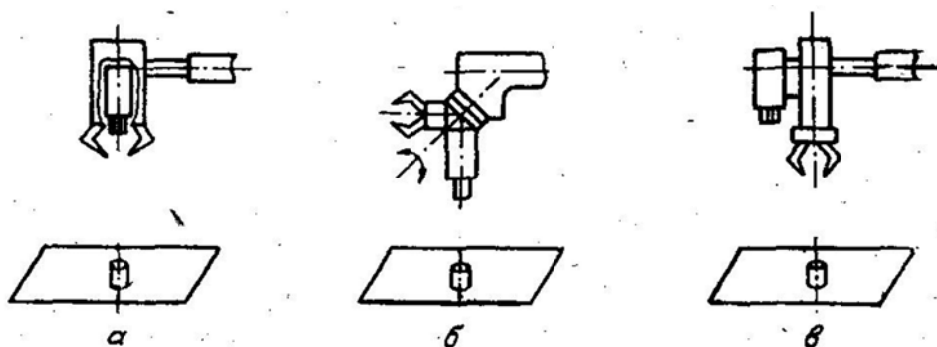


Рис. 6.45. Варианты установки датчика СВО на «руке» ПР

Эта схема установки датчика реализована в экспериментальной системе визуального очувствления (СВО) промышленного робота «РМ-104». На рис. 6.46 показана структурная схема системы управления роботом с СВО, построенная на основе датчика видеосигнала матричного измерительного (ДВМИ-1) с преобразователем типа ПЗС и блоком определения координат (БОК).

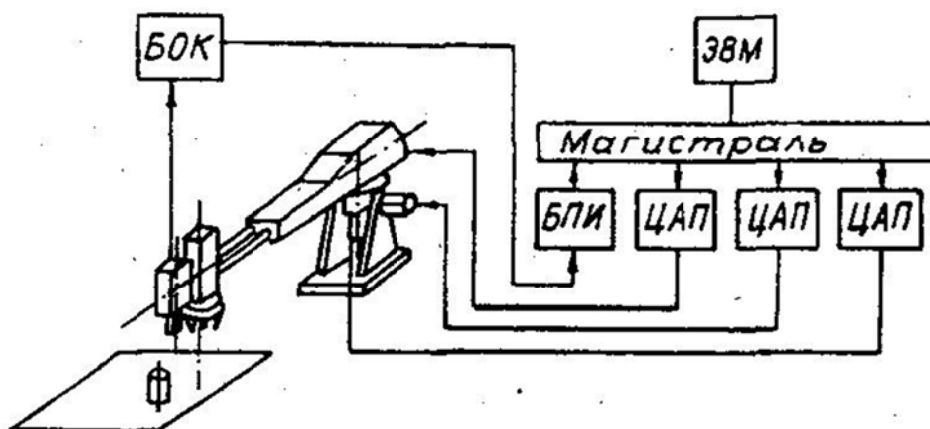


Рис. 6.46. Структурная схема системы управления ПР с СВО

Для обеспечения качественного освещения рабочего стола СВО дополняется осветительным устройством, расположенным на «руке» ПР. Управление им осуществляется автоматически с целью поддержания заданной амплитуды видеосигнала.

При установке датчика СВО на «руке» ПР поле его обзора ограничено, поэтому для точного наведения на ОМ требуется либо предварительно переместить «руку» ПР с датчиком в зону предполагаемого расположения объекта, либо организовать ее (сканирование) в пределах рабочей зоны с целью обнаружения ОМ.

Информация о положении ОМ (координаты  $X$ ,  $Y$ ) в поле зрения датчика формируется в БОК в виде параллельного 8-разрядного кода, поступающего в систему управления робота через блок параллельного интерфейса (БПИ). В зависимости от положения объекта ЭВМ формирует электрические сигналы, пропорциональные управляющим воздействиям, которые через ЦАП поступают на приводы робота, обеспечивающие перемещение его исполнительного органа в направлении ОМ по траектории, близкой к отрезку прямой.

Программное включение режима оптического наведения производится отдельной директивой, дополняющей язык управления роботом. Эта директива обозначена буквой «Г» и имеет параметр, определяющий величину требуемого для нормального захвата объекта перемещения схвата ПР после позиционирования по датчику.

Испытания экспериментальной СВО показали, что она надежно определяет координаты положения объектов в диапазоне внешней освещенности от 0 до 2500 лк при отношении коэффициентов отражения объекта от фона не менее 1,5. В качестве ОМ использовались заготовки и детали тел вращения диаметром 10...60 мм, установленные перпендикулярно поверхности рабочего стола.

Устройство распознавания и определения координат объектов (УРОК) относится к классу гибкопрограммируемых систем технического зрения и предназначено для оснащения роботизированных технологических комплексов и гибких производственных систем. Структурная схема УРОК показана на рис. 6.47.

В качестве вычислительного ядра УРОК используется микроЭВМ. В состав УРОК входят также интерфейсный модуль (ИМ), обеспечивающий обмен информацией с внешними устройствами, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) для хранения рабочих программ, осветитель (О), телевизионный датчик (ТД), видеоконтрольное устройство (ВКУ), блок дискретизации и квантования видеосигнала (БДК), блок управления режимом освещения (БУРО), коммутатор магистрали видеоданных (КВ), блок адаптивного преобразования видеосигнала (БАП), дискриминатор видеосигнала (ДВ), блок обработки бинарного видеосигнала (БОБВ), блок подготовки данных (БПД), ОЗУ кадра изображения (ОЗУК), спецпроцессор обработки контуров (СП).

ПЗУ, ИМ, БУРО, КВ, БДК, БАП, ДВ, БОБВ, БПД и СП подключены к магистрали микроЭВМ, и при этом каждый из этих модулей имеет в адресном пространстве ЭВМ набор программно-доступных регистров, посредством которых ЭВМ взаимодействует с этими модулями. Обмен же видеоданными между ними осуществляется по специализированной магистрали видеоданных, направления потоков в которой определяются сигналами с КВ и могут быть различным образом запрограммированы. При этом обеспечивается гибкость в работе системы и реализуется конвейерный принцип обработки видеоданных, при котором информация, поступающая с ТД, обрабатывается и записывается в ОЗУК в темпе телевизионной развертки.

Функционирование УРОК происходит под управлением внешних устройств (например, робота, совместно с которым используется УРОК) посредством набора команд, поступающих от этих устройств через ИМ. Основными командами, воспринимаемыми схемой УРОК, являются тестировка, калибровка, обучение, поиск детали и анализ поля зрения.

При тестировании производится проверка основных узлов УРОК, при калибровке определяются координаты реперных точек в поле зрения, а в процессе обучения осуществляются расчет и усреднение признаков предъявляемого объекта, к которым относятся периметр, площадь, минимальный и максимальный радиусы, количество отверстий и моменты первого и второго порядков. Определенный таким образом в пространстве признаков присваивается заданный код.

В режиме поиска детали происходит распознавание необходимого объекта, определение его положения и ориентации. Режим анализа поля зрения характеризуется распознаванием всех объектов в поле зрения и вычислением параметров их положения. Необходимо отметить, что вышеперечисленные режимы являются основными и реализуются набором программных модулей, активизируемых в микроЭВМ при поступлении команд. Исходными данными для работы этих модулей служат табличные описания контуров объектов, получаемых на этапе предварительной обработки изображения.

Процесс предварительной обработки выглядит следующим образом. ТД обеспечивает получение плоского изображения, предназначенного для распознавания объектов (или реперных точек при калибровке), затем в БДК происходит дискретизация видеосигнала по времени и квантование по уровню, причем как частота дискретизации, так и диапазон квантования могут программно задаваться. В БАП производится процедура адаптивного квантования изображения по модам на основании гистограмм яркостей, считываемых по укрупненному растру с одного кадра изображения. В ДВ обеспечивается получение бинарного

видеосигнала с адаптивным автоматическим выбором порога. БОБВ осуществляет фильтрацию бинарного видеосигнала и его оконтуривание, а БПД по полученному контурному изображению производит определение координат контурных точек и запись их в ОЗУК. В СП реализуются алгоритмы обхода контуров, их проверка на связность и формирование табличных описаний контуров. Производительность СП при обработке контуров составляет около 8 млн. оп/с [6.14]. Конструктивно УРОК включает в себя электрический блок, ВКУ и ТД, подключенные к блоку посредством кабелей. Габаритные размеры электрического блока 600×500×250 ммз, его масса не более 15 кг.

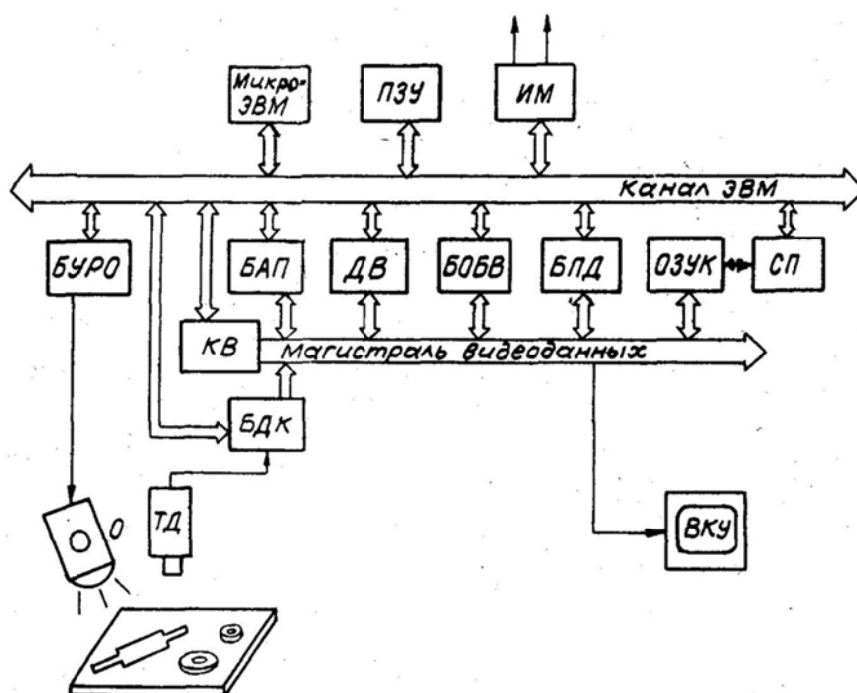


Рис. 6.47. Структурная схема УРОК

Время реакции УРОК на поступающую команду не более 1,5...2 с, за исключением команды «обучение», время выполнения которой достигает 15...20 с. Максимальная дискретность изображения составляет по кадру 256 строк, по строке – 400 элементов. Объем памяти ОЗУК – 16×16 К, время доступа к ОЗУК – не более 80 нс. УРОК используется совместно с установкой узлов шаговых двигателей и служит для распознавания и определения координат механических деталей типа «вал», «диск», «крышка», «втулка», расположенных на рабочей плоскости. При работе в условиях реального цеха с искусственным освещением достоверность распознавания составила около 90 %.

Лазерно-оптоэлектронный дальномер (ЛОД-1) предназначен для бесконтактного измерения расстояния до изделия от базовой линии оп-



тической системы. Изделия могут быть выполнены из различных материалов с поверхностями от зеркальных до матовых, любого цвета. ЛОД-1 состоит из выносной оптоэлектронной головки, содержащей объектив с интегральной МДП-фотодиодной линейкой, и электронного блока. В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер типа ЛГ-78 (ОКГ-13, ЛГН-213 и др.).

Работа устройства основана на триангуляционном способе измерений. На объект контроля направляется луч лазера. Изображение лазерного пятна проецируется на фотоприемник с другого углового направления. В качестве фотоприемника используется отечественная интегральная МДП-фотодиодная линейка типа ТС-26. Электронный блок устройства обеспечивает развертку фотолинейки и соответствующую обработку сигнала для выделения информации о положении проекции изображения пятна в требуемом динамическом диапазоне изменений интенсивности.

Электронный блок содержит 5 функциональных блоков-модулей, выполненных на интегральных микросхемах К176 (К561), К544, К155 серий. Принцип работы ЛОД-1 заключается в следующем. Малорасходящийся луч лазера (Л) направляется на объект контроля. Лазер и оптоэлектронная головка (ОЭГ) устанавливаются на одном основании таким образом, чтобы их оптические оси пересекались и луч лазера падал перпендикулярно к установочной оси объекта контроля. ОЭГ содержит объектив (О) и интегральную МДП-фотодиодную линейку (ИФЛ). При изменении расстояния до объекта контроля пропорционально меняется положение проекций пятна на ИФЛ от лазерного луча. По положению проекции пятна определяется дальность. ИФЛ опрашивается с помощью блока развертки (БР), который формирует необходимую диаграмму импульсных напряжений. В блоке выделения и линейной обработки сигнала (БВ и ЛОС) происходят выделение и усиление видеосигнала с фильтрацией темнового геометрического шума. В блоке нелинейной обработки сигнала (БНОС) производится активное формирование информационного сигнала, пропорционального координате центра проекции пятна.

Для обеспечения нормальной работы дальномера при различных угловых ориентациях объекта контроля, выполненного из различных материалов, происходит адаптация фоточувствительности путем автоматического регулирования времени экспозиции ИФЛ.

Сформированный сигнал координаты через интерфейсный блок сопряжения (БС) выдается в параллельном двоичном коде на ЭВМ. Устройство также имеет цифровую и аналоговую индикации. На цифровом табло (ЦТ), управляемом блоком цифровой индикации (БЦИ),

индицируется величина дальности. Стрелочный индикатор (СИ) показывает отклонение текущей дальности от номинальной.

#### Основные технические характеристики:

Номинальный диапазон измерения дальности, перекрываемый при регулировании оптической системы	не менее 100 мм...10 м
Пределы измерений	10 мм...0,5 м
Разрешающая способность, мкм	1...100
Число изм/с	250
Питание от сети переменного тока	
частота, Гц	50
напряжение, В	220 ±10 %
Потребляемая мощность, Вт	50
Габаритные размеры:	
электронного блока, мм <sup>3</sup>	270×135×260
выносной оптоэлектронной головки, мм <sup>3</sup>	100×70×70
Масса:	
электронного блока, кг	6
оптоэлектронной головки, кг	0,3

Перспективным путем решения задачи контроля режущего инструмента (РИ) является применение МП и телевизионных камер на основе приборов с зарядовой связью. В этом направлении МИФИ совместно с ЭНИИМС разработана экспериментальная диагностическая система (рис. 5.48). В качестве устройства приема и обработки видеoinформации используется автономная микроЭВМ «Электроника 60М», что позволяет подключать к каналу ЭВМ до восьми телекамер для наблюдения за работой нескольких станков. Ориентировочный объем памяти составляет 3 Кбайт ПЗУ для хранения программ обработки видеoinформации и расчетов и 1 Кбайт ОЗУ для записи данных.

Телевизионная камера состоит из оптической системы, ПЗС-матрицы и схем управления работой ПЗС. В качестве оптической системы используются стандартные объективы. Конструктивные параметры телекамеры зависят от требований по разрешающей способности измерения и условий установки ее на станок. Порядок проектирования при этом следующий:

- 1) определяются размеры поля зрения объекта контроля (рис. 6.49);
- 2) находится разрешающая способность телекамеры  $\varepsilon$  для заданного  $u_1$  (рис. 6.50);

- 3) выбирается фокусное расстояние объектива, исходя из условия обеспечения минимально возможного расстояния телекамеры до объекта контроля (рис. 6.51);
- 4) определяется расстояние от оптического центра объектива до ПЗС-матрицы по формуле  $a_2 = a_1 f / (a_1 - f)$ .

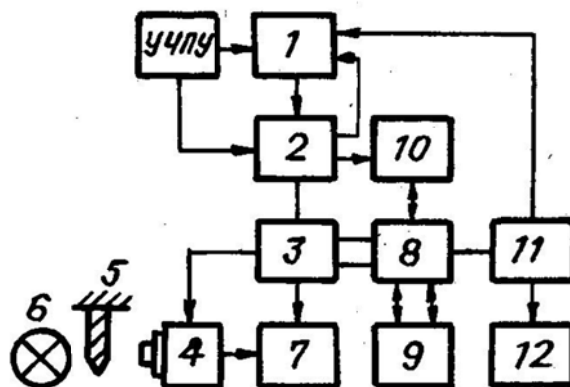


Рис. 6.48. Структурная схема системы автоматического контроля исправности режущего инструмента:

- 1 – автомат станка, 2 – модуль связи УЧПУ с устройством контроля,  
 3 – интерфейс, 4 – телекамера, 5 – объект контроля,  
 6 – осветитель, 7 – видеоконтрольное устройство, 8 – процессор микроЭВМ,  
 9 – программа обработки видеoinформации,  
 10 – программа управления работой устройства,  
 11 – блок принятия решения о состоянии объекта, 12 – блок сигнализации

Приведенные на графиках (рис. 6.50, 6.51) зависимости определены для ПЗС-матрицы с размером области проекции изображения  $3,9 \times 4,8$  мм.

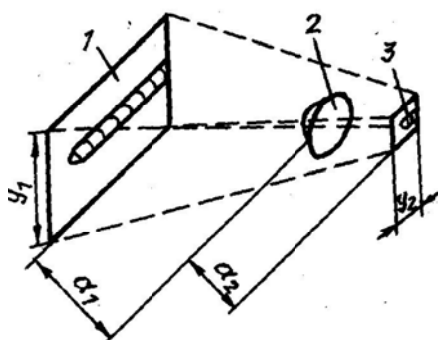


Рис. 6.49. Конструктивные параметры СТЗ:

- 1 – поле зрения объекта контроля ( $Y_1$ ); 2 – оптическая система ( $f$ );  
 3 – область проекции изображения ( $Y_2$ );  
 $a_1$  – расстояние от объекта до центра оптической системы;  
 $a_2$  – расстояние от центра оптической системы до матрицы ПЗС

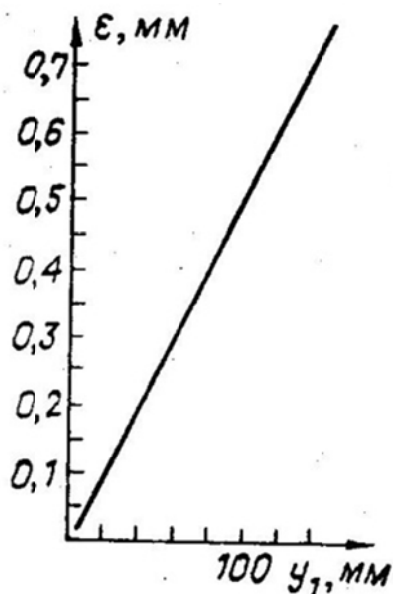


Рис. 6.50. Зависимость разрешающей способности телекамеры от поля зрения объекта контроля

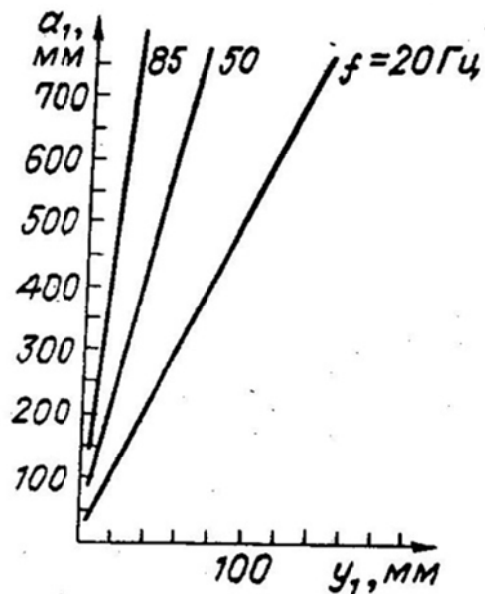


Рис. 6.51. Зависимость расстояния от объекта до центра оптической системы от поля зрения объекта контроля для разных частот

Таким образом, гибкая конструктивная настройка СТЗ на конкретные условия контроля и простота конфигурации технических средств обеспечивают возможность встраивания системы контроля РИ практически на любой многоцелевой станок с ЧПУ фрезерно-сверлильно-расточной группы.

Алгоритм обучения системы состоит из ряда модулей, каждый из которых формирует информацию, необходимую для распознавания конкретной разновидности РИ. В результате обучения формируется информационная модель, представляемая в ОЗУ микроЭВМ в виде управляющей таблицы обучения (УТО), интерпретируемой алгоритмами классификации в режиме контроля РИ.

Каждая позиция инструмента (И) описывается одной строкой УТО, включающей следующую информацию: номер позиции РИ в И, код разновидности и значение вылета РИ, наружный диаметр, малый диаметр конуса заборной или режущей части, шаг винтовой линии или длина контролируемого участка заборной части, длину конуса заборной части, эталонное значение признака, длину контролируемого участка калибрующей части. При этом из девяти требуемых параметров два первых задаются оператором в режиме диалога с микроЭВМ, а остальные вычисляются автоматически в соответствующих программных модулях. Процессорное время обучения для одного экземпляра РИ составляет 1...4 с [6.12].

Таблица 6.3

Результирующая таблица признаков изображений РИ

Признак, $\delta$	Тип режущего инструмента	Вид аномалии	Разрешающая способность контроля (при $\xi=0,02$ , $d=20, p=0,1$ ), %	Пороговые значения признака, $\Delta\delta$
$l$	Все типы	Поломка	2,8	$0,5 dR$
$C_{\Delta}$	Сверло спиральное, зенкер, фреза с четным числом зубьев	Скол, выкрашивание	2	$0,25 dR$
$S_{\Delta}$	Развертка, зенковка, расточная оправка, фреза торцевая, дисковая	Скол, выкрашивание	1,9	$0,5 kd^2R$
$S_{T/2}$	Зенкер с нечетным числом зубьев	Скол, выкрашивание	2,8	$0,5 kd^2R$
$dS_{\Delta}$	Метчик	Скол, выкрашивание	2,5	$0,5 kd^2R$

Среди признаков, характеризующих изображение РИ, эффективных в смысле минимизации вероятности ошибки классификации, исследовались следующие:  $l$  – значение проекции изображения на ось вращения РИ (ось  $X$ );  $C_{\Delta}$  – координата центра тяжести сегмента изображения, протяженность которого  $\Delta l$  равна математическому ожиданию продольного размера скола (выкрашивания)  $\Delta x$ ;  $S_{\Delta}$  – площадь сегмента изображения с  $\Delta l = \Delta x$ ;  $S_{T/2}$  – площадь сегмента изображения с  $\Delta l = T/2$ , где  $T$  – шаг винтовой линии;  $dS_{\Delta}$  – разность площадей соседних сегментов изображения, каждый из которых имеет  $\Delta l = \Delta x$ .

По результатам исследований произведена классификация РИ по наиболее эффективным признакам для контроля исправности РИ (табл. 6.3). При этом под разрешающей способностью контроля понимается минимальное относительное значение дефекта (скола режущих зубьев, выкрашивания калибрующей части или поломки), распознаваемого при заданных условиях (уровне шумов  $\xi$ , значении наружного диаметра в точках растра  $d$ , вероятности ошибки классификации  $p$ ).

В режиме контроля осуществляются отвод РИ из зоны резания в специальную позицию контроля и периодический осмотр РИ при медленном его вращении. Классификация аномалий на РИ каждый раз инициируется по команде УЧПУ «контроль РИ», содержащей и некоторую вспомогательную информацию, в частности, код позиции контролируемого РИ в инструментальном магазине. Код позиции является «ключом», по которому осуществляются доступ к сформированным при обучении данным о типе РИ, эталонном значении признака и т. д. и выборе соответствующего программного модуля контроля.

Алгоритм классификации аномалий на РИ имеет многоуровневую структуру. На каждом уровне последовательно решается задача распознавания двух классов состояний РИ. Первому (верхнему) уровню соответствует элементарный распознаватель типа поломка-неполомка, второму – скол-нескол, третьему – выкрашивание-невыкрашивание. В узлах классификационного дерева решение принимается в пользу наличия геометрической аномалии РИ, если расхождение между эталонным и вычисленным значениями признаков превышает некоторое пороговое значение:  $|\delta - \delta_0| > \Delta\delta$ ,  $\Delta\delta = \Delta\delta(R, d, k)$ , где  $\delta$ ,  $\delta_0$  – соответственно признак, вычисленный по входному изображению, и эталонный признак;  $\Delta\delta$  – порог распознавания;  $R$  – разрешающая способность контроля аномалий;  $d$  – диаметр РИ в точках растра;  $k$  – отношение математического ожидания продольного значения дефекта к диаметру.

### **6.6.7. Системы технического зрения для контроля объектов в рабочей зоне робота**

Оптоэлектронные сенсоры ОС-1 и ОС-2 представляют собой малогабаритные выносные устройства, предназначенные для установки непосредственно на роботе-манипуляторе с целью определения положения и вида изделия на рабочем столе робота. Их можно классифицировать как малоформатные системы технического зрения. Ограниченное поле зрения и небольшое количество фотоячеек этих СТЗ позволяют определить координаты и вид изделия с помощью ЭВМ в реальном масштабе времени. Управление работой и питание СТЗ осуществляются от ЭВМ М-6000. Малые размеры устройства (менее  $60 \times 40 \times 110$  мм<sup>3</sup>) и масса (менее 250 г) позволили устанавливать их в области захвата робота.

Коммутация столбцов фотоматриц в ОС-1 и ОС-1М осуществляется одновременно по всем строкам в соответствии с двоичным кодом, подаваемым с ЭВМ. Функциональная схема сенсора ОС-1 и ОС-1М приведена на рис. 6.52. С ЭВМ через интерфейсный блок сопряжения ИБС выдается сигнал стирания, который через ключ (Кл) поступает на шину стирания ИФМ. Кроме того, через интервал времени экспозиции выдает-

ся двоичный код выбора столбца. Дешифратор (ДШ) включает фотоячейку выборочного столбца. Усиленные сигналы по 16 строкам одновременно подаются через буферный усилитель (БУ) на БС ЭВМ М-6000.

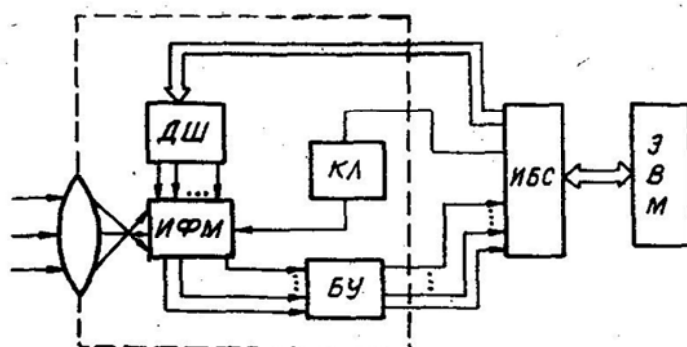


Рис. 6.52 Функциональная схема оптоэлектронного сенсора ОС-1

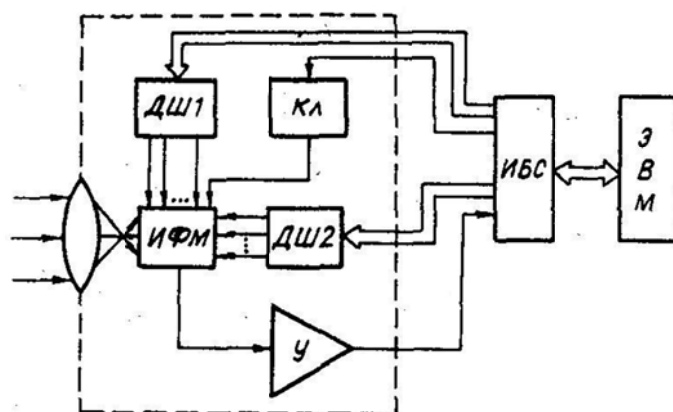


Рис. 6.53. Функциональная схема оптоэлектронного сенсора ОС-2

Система технического зрения ОС-2 выполнена на основе интегральной МДП-фотодиодной матрицы МФ-14 (ФПУ-14), имеющий  $32 \times 32$  элемента. Габаритные размеры –  $80 \times 80 \times 80$  мм<sup>3</sup>, масса – 250 г. Функциональная схема сенсора ОС-2 приведена на рис. 6.52. Двоичный код в ОС-2 подается на два дешифратора – по столбцам и по строкам, а выходной сигнал снимается по одному каналу. Через ИБС с ЭВМ выдается двоичный код по столбцам на дешифратор (ДШ2). Перед этим на ключ подается импульс стирания. Сигнал с выбранной фотоячейки на пересечении выбранных строки и столбца, преобразованный усилителем (У), поступает на АЦП ЭВМ М-6000 через ИБС.

Таким образом, осуществляются параллельная и произвольная выборки фотоячеек фотоматрицы в СТЗ, что позволяет уменьшить время обработки информации в ЭВМ и обеспечить реальный масштаб времени. Наиболее перспективными являются СТЗ на основе сигнатурного анализа. Сущность метода сигнатурного анализа заключается в выпол-

нении операции полиномиального деления над выходным многочленом, состоящего из элементов поля Галуа  $GF(2)$ .

Выражение, описывающее вариант с одноканальным вводом информации для сигнатурного сжатия, имеет вид

$$f(x) = Q(x)\varphi(x) \oplus g(x),$$

где  $g(x)$  – сигнатура, полученная в результате сжатия последовательности  $f(x)$  в сигнатурном анализаторе; делитель  $\varphi(x)$  – примитивный неприводимый полином над полем  $GF(2)$ ,  $\oplus$  – операция суммирования по модулю 2.

В результате сканирования видеоизображения' телевизионным rasterом формируется последовательность битов  $f(x)$  большой длины. После обработки последовательности  $f(x)$  на выходе сигнатурного анализатора будет получено многобразрядное слово – сигнатура. По итогам сравнения ее значения с эталонными сигнатурами производится классификация изображений на годные и дефектные.

При выполнении операции деления входной последовательности  $f(x)$  на характеристический полином схемы  $\varphi(x)$  изменение входной последовательности фиксируется с точностью до одного бита. В результате формируется сигнатура, значение которой может сильно отличаться от номинального.

Особенностью использования данного метода для анализа бинарного видеоизображения является неоднозначность, возникающая во входной последовательности. Она заключается в изменении геометрических размеров каждой из контролируемых структур в пределах допуска. Если изображения двух контролируемых топологий отличаются друг от друга хотя бы на один дискрет, на выходе устройства сжатия, после обработки, формируются несовпадающие сигнатуры. Для устранения этой неоднозначности в адресном пространстве устройства памяти формируется множество эталонных сигнатур бездефектных объектов, полученных в результате обучения представительной выборкой.

Классификация контролируемых изделий осуществляется посредством сравнения соответствующих им сигнатур с эталонными, хранящимися в запоминающем устройстве. Совпадение значений сигнатур эталонной и контролируемой структур означает, что исследуемый объект соответствует данному классу годных изделий. В случае, если при визуальном контроле необходимо решить задачу по выделению информативных признаков изображения топологических структур, используется метод сканирования «электронным окном». При таком считывании видеoinформации данные поступают в устройство сжатия в векторной



форме. Для обработки полученных массивов используется многоканальный ввод информации и сигнатурный анализатор, в основу которого положено свойство линейного суммирования над полем GF(2).

В связи с тем, что общее количество возможных комбинаций получаемых сигнатур зависит от размерности сдвигающего регистра  $r$  сигнатурного анализатора и определяется из выражения  $N = 2^r$ , в  $i$ -х точках адресного пространства элементов памяти возможно пересечение подмножеств бездефектных сигнатур  $g^{\Gamma}$  с сигнатурами дефектных  $g^{\Delta}$ , что соответственно оказывает влияние на достоверность обнаружения

$$g_i = \{g_1^{\Gamma}, g_2^{\Gamma}, \dots, g_n^{\Gamma}\} \cap \{g_1^{\Delta}, g_2^{\Delta}, \dots, g_k^{\Delta}\}.$$

По предварительной оценке вероятность пропуска аномалий для данного метода составляет 0,4...0,0015 % при длине сдвигающих регистров 8...16 разрядов соответственно.

Система технического зрения контроля топологических структур на основе сигнатурного анализа представлена на рис. 6.54. Исследуемая структура устанавливается и закрепляется на координатном столе. С помощью системы подсвета осуществляется контрастирование силуэтов топологической структуры относительно подложки.

В качестве устройства приема изображения используется телекамера типа КТП-2 на ПЗС-матрице. Сформированный видеосигнал для преобразования в цифровую форму поступает в квантователь. Полученное на выходе бинарное описание изображения представляет собой последовательность дискретных импульсов  $f(x)$ , где элементам топологии соответствует значение логической «1», а фону – логического «0» или наоборот.

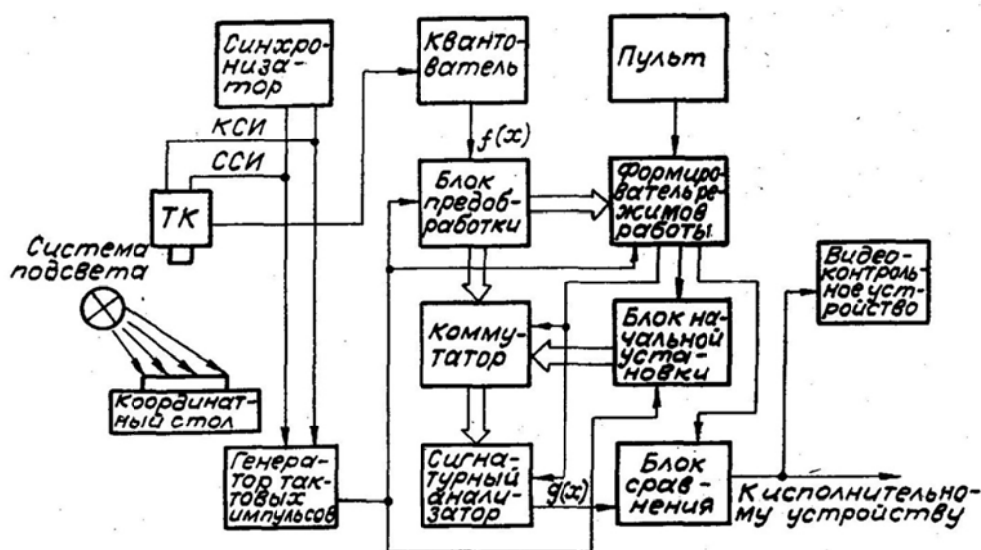


Рис. 6.54. Функциональная схема СТЗ на основе сигнатурного анализа

Синхронизатор и генератор тактовых импульсов формируют последовательность кадровых и строчных синхроимпульсов, а также задают частоту обработки входного потока информации для функциональных блоков вычислительного устройства.

В блоке предобработки решается сразу несколько задач, одной из которых является организация потока данных в зависимости от вида анализа контролируемого изображения. Если в процессе его обработки необходимо выделять пространственные информативные признаки, в этом случае входной бинарный поток представляет собой параллельные видеосигналы нескольких строк. В связи с этим предпочтительнее для обработки применять сигнатурный анализатор параллельной конфигурации.

С помощью блока предобработки формирователя режимов работы реализуется функция частичной фильтрации входного потока, а также включение или выключение сигнатурного анализатора при сканировании телевизионным растром контура объекта. Данное решение позволяет анализировать объекты независимо от их расположения по полю изображения и зашумленности последнего.

С пульта оператором задаются три режима работы СТЗ – обнуление, обучение и контроль. Во время выполнения первого осуществляется подготовка элементов памяти блока сравнения для хранения новой информации. В режиме обучения в адресное пространство элементов памяти заносятся значения сигнатур, соответствующих изображениям эталонных структур. При контроле производится дефектоскопическая оценка исследуемого изделия посредством сравнения сигнатуры, полученной в результате сжатия контролируемого изображения, с эталонными, хранящимися в блоке сравнения.

Блок начальной установки представляет собой наборное поле переключателей, с помощью которых формируется начальное словосостояние сдвигающего регистра сигнатурного анализатора. По сигналу, поступающему из формирователя режимов работы, выбранное начальное словосостояние через коммутатор вводится в сдвигающий регистр сигнатурного анализатора. Начальная установка сдвигающего регистра позволяет получать достоверные результаты контроля независимо от количества тактов, в течение которых выполнялось сжатие изображения контролируемой структуры.

После ввода начального слова в сигнатурный анализатор через коммутатор из блока предобработки начинает поступать поток данных. Полученная результирующая сигнатура в блоке сравнения сопоставляется с эталонными. Если значение сигнатуры контролируемого изображения не совпадает ни с одной из эталонных сигнатур, то на экран видеоконтроль-

ного устройства выводится метка, сигнализирующая о наличии дефекта, а также поступает сигнал к исполнительному устройству.

Предложенная система технического зрения на основе сигнатурного анализа позволяет решать задачи автоматизации визуального контроля – определение наличия объекта обнаружения, классификацию, контроль движения предметов, задачу периодичности, наличие поворота, ориентацию объекта контроля.

### 6.6.8. Системы технического зрения для распознавания символов

Система распознавания символов на базе системы технического зрения БИТ-21 предназначена для распознавания семисегментного кода, записанного арабскими цифрами. Структурная схема представлена на рис. 6.55.

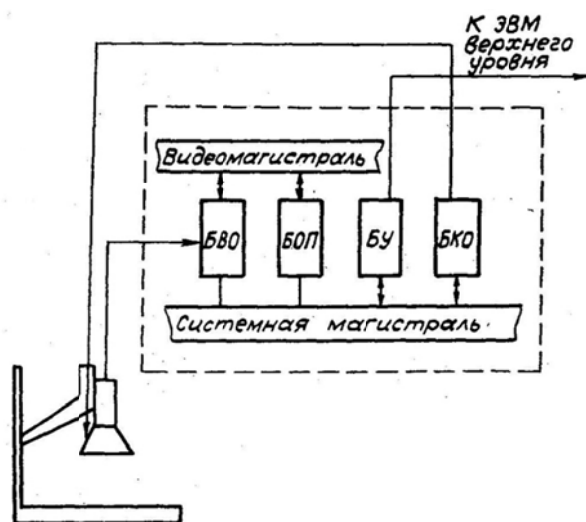


Рис. 6.55. Система распознавания кода на базе СТЗ «БИТ-21»

Алгоритм работы системы распознавания символов заключается в том, что исследуемое изображение числа вводится в память системы и обрабатывается следующим образом: 1) от всего числа выделяется одна цифра, 2) запоминается ее местоположение в числе, 3) вычитаются признаки исследуемой цифры, 4) анализируя признаки, распознают цифру, 5) аналогично обрабатываются другие цифры, 6) в соответствии с местоположением цифр получают число.

#### Технические характеристики

Освещенность, лк		0...2500
Размеры поля обзора, мм <sup>2</sup>	не более	50×30
Размеры объекта, мм <sup>2</sup>	не более	40×20
Радиус кривизны плоскости объекта, м	не менее	1,5

Расстояние от камеры до объекта, мм		от 150 до 200
Изображение объекта черно-белое, уровень контраста	не менее	0,7
Время считывания информации, распознавания кода, с		2

Система технического зрения «Шмель» предназначена для восприятия и обработки изображений стандартного машинописного текста с целью распознавания символов, их запоминания и вывода на твердую печать либо в канал персональной ЭВМ. Область применения – размножение документов, ввод документов в ЭВМ при их автоматизированной обработке.

Система технического зрения содержит механическое сканирующее устройство для последовательного просмотра символов строки текста, малоформатную видеокамеру, преобразующую изображения символов в коды, вычислитель с клавиатурой управления для обработки и распознавания изображений и видеомонитор. Особенностью системы является простота аппаратурной части и программного обеспечения за счет использования кадра малого формата и однокристалльной микроЭвм.

#### Основные технические данные

Разрешающая способность видеокамеры	1/32 поля обзора
Угловое поле зрения, град	30
Тип микропроцессора блока вычислителя	KP1816BE35
Емкость экранного ОЗУ, Кбайт	4
Емкость ППЗУ команд, Кбайт	4
Время обработки кадра, с	0,05...0,5
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	
видеокамеры	120×50×80
вычислителя	300×200×35
Питание	220 В, 50 Гц, 30 Вт

#### **6.6.9. Системы технического зрения для автоматизации хлопкоуборочных процессов**

Система технического зрения для автоматизации хлопкоуборочных процессов предназначена обеспечивать всей необходимой информацией хлопкоуборочную машину для выполнения технологических процессов без участия человека. Она должна оценивать параметры агротехнического фона хлопкового поля, локальную и общую урожайность, полноту машинного сбора хлопка-сырца; обнаруживать объекты и их классифицировать; формировать цифровые коды управляющих сигналов и на ос-

нове вышеперечисленных функций обеспечивать эффективную подстройку рабочих органов хлопкоуборочной машины (ХМ) соответственно по агротехническому фону хлопкового поля, контроль качества работы ХМ, направленное движение ее по хлопковому полю, ориентацию и безопасную работу. Выходными сигналами СТЗ являются цифровые коды управляющих и информирующих сигналов (рис. 6.56).

Свойство хлопкового волокна давать большую амплитуду видеосигнала в интегральной и узких спектральных зонах видимого спектра излучения по сравнению с остальными элементами хлопкового поля является постоянным и определяется белым цветом хлопка. Это позволяет принять за качественный информативный признак контрастность хлопка-сырца, а за количественные информативные признаки – наличие раскрытых хлопковых коробочек и их пространственное расположение на хлопковом поле.

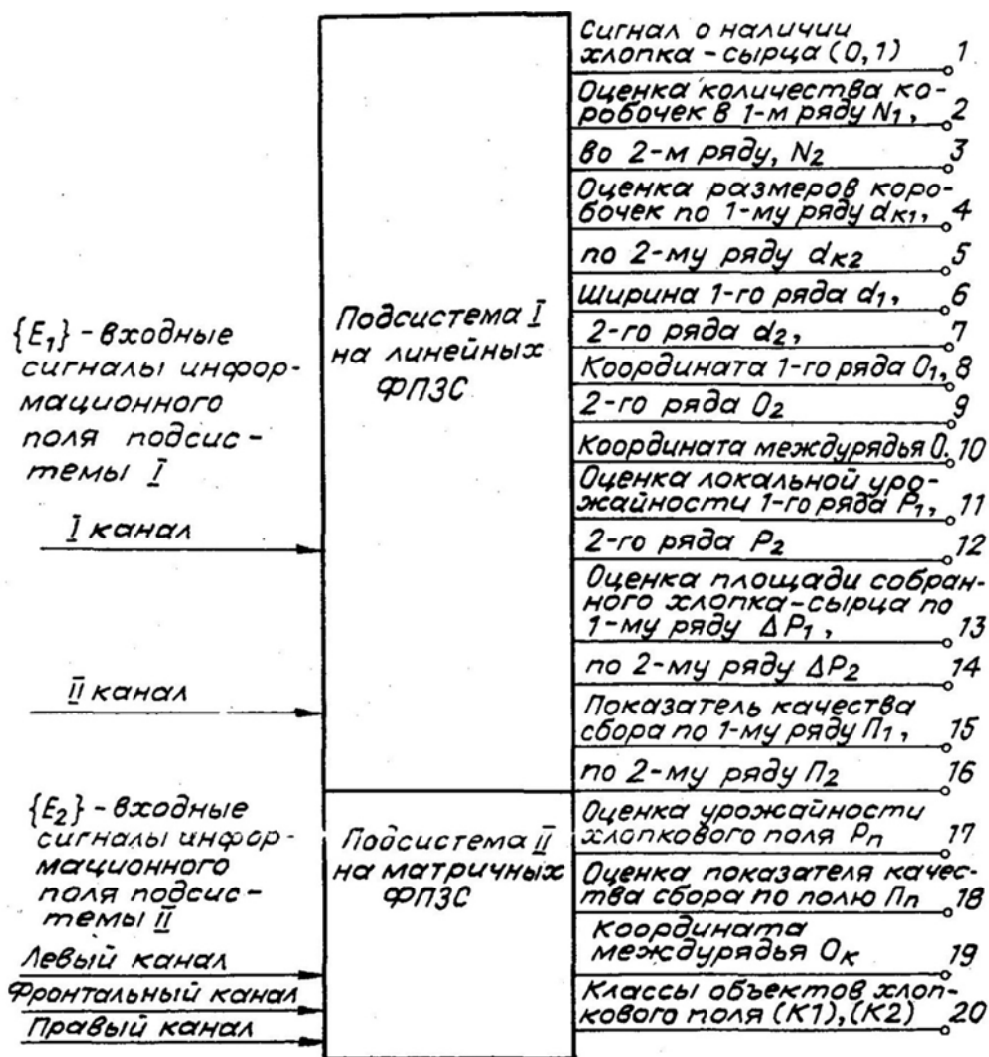


Рис. 6.56. Входные и выходные сигналы СТЗ

Принцип действия СТЗ ХМ основан на отображении поперечного размера раскрытой (белой) части каждой хлопковой коробочки и ее координаты по оси  $x$  информационного поля в виде выходного напряжения первичного преобразователя – фоточувствительной схемы с зарядовой связью (ФПЗС), его преобразования и дальнейшей цифровой обработки сигналов от всех коробочек информационного поля на элементах микропроцессорной техники.

Выходной сигнал ФПЗС, соответствующий отдельной  $\xi$ -й раскрытой хлопковой коробочке  $j$ -го сканирования информационного поля, может быть представлен в виде  $A(t)_{\xi,j} = U(t)_{\xi,j} + U_0(E)$ ,  $U_0(E)$  – является, помехой, вызванной общим фоном  $E_\phi$  на оптическом входе ФПЗС;  $U(t)_\xi$  – импульсный сигнал с амплитудой  $U_m$ , начальный момент  $t_{\xi,j}$  которого однозначно соответствует координате раскрытой хлопковой коробочки по  $x, \xi$ , а длительность  $\tau_{\xi,j}$  – ее поперечному размеру по линии сканирования.

В целях выделения полезного сигнала  $U(t)$  осуществляется вычитание из  $A(t)_\xi$  порогового напряжения  $U_\Pi(E)$ , превышающего  $U_0(E)$ . Выделенный полезный сигнал  $u(t)$  преобразуется в цифровой сигнал

$$A_{t,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } A(t)_{\xi,j} \geq U_\Gamma(E), \\ 0, & \text{если } A(t)_{\xi,j} < U_\Gamma(E). \end{cases}$$

По выполняемым функциям и используемым типам первичных преобразователей СТЗ разделена на 1) подсистему на линейных ФПЗС (подсистема I), состоящую из двух идентичных каналов, и 2) подсистему на матричных ФПЗС (подсистема II), состоящую из трех идентичных каналов. Информационное поле подсистемы I для двухрядной ХМ имеет вид прямоугольника, шириной  $X$  и длиной  $Y$ , и охватывает два рядом расположенных хлопковых ряда и междурядья. Первый канал подсистемы I обеспечивает сканирование информационного поля до воздействия на него рабочих органов ХМ, второй – после воздействия рабочих органов ХМ. Каналы подсистемы II обеспечивают обзор общего информационного поля системы ПОИ в пределах  $\pm 135^\circ$  в направлении движения от продольной оси ХМ. Углы зрения левого ( $\alpha_1$ ), фронтального ( $\alpha_\phi$ ) и правого ( $\alpha_\Pi$ ) каналов подсистемы II составляют  $90^\circ$  при общем угле обзора  $\pm 135^\circ$  в направлении движения от продольной оси ХМ.

Система технического зрения для автоматизации хлопкоуборочных процессов содержит следующие основные блоки (рис. 6.57).

1. Оптический блок осуществляет изменение масштаба информационного поля подсистемы, т. е. служит для согласования размеров информационного поля и чувствительного слоя первичного преобразователя.

2. В блоке первичного преобразователя в подсистеме I используется линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью (ЛФПЗС), осуществляющая преобразование распределения освещенности в зарядовый рельеф, соответствующий этому распределению. На ее линейную чувствительную поверхность проецируется изображение при помощи соответствующего оптического блока. Информация по второй проекции, совпадающей с направлением движения ХМ, поступает по мере ее движения и опроса в ЛФПЗС.

Таким образом, за время  $t_{ск}$ , соответствующее продвижению ХМ на  $Y$  последовательно сканируется информационное поле размером  $2 \times Y$ . В блоке первичного преобразователя в подсистеме II используется матричная фоточувствительная схема с зарядовой связью (МФПЗС), обеспечивающая преобразование освещенности чувствительного слоя МФПЗС в зарядовый рельеф, соответствующий этой освещенности.

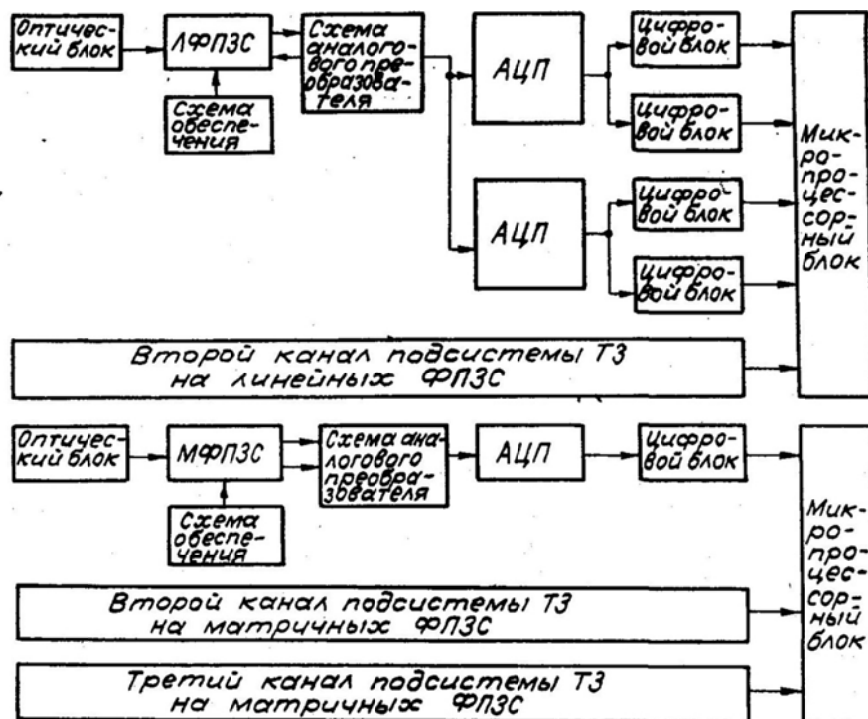


Рис. 6.57. Структурная схема СТЗХМ

3. В подсистемах I и II для работы ЛФПЗС и МФПЗС необходимы импульсные напряжения, постоянные смещения напряжений на затворах, которые обеспечивают режимы накопления переноса и вывода накопленных сигнальных зарядов.

4. Блок аналогового преобразования видеосигнала осуществляет усиление видеосигнала по амплитуде и выделяет низкочастотную огибающую видеосигнала, которая содержит информацию о распределении хлопкового волокна.

5. В качестве АЦП используются компараторы, которые осуществляют выделение сигнала, характеризующего хлопковое волокно, путем сравнения низкочастотной огибающей видеосигнала с пороговым напряжением сравнения  $U_{\Pi}(E)$ .

6. Цифровые блоки выполняют необходимые преобразования и запись цифровых кодов для согласования поступающей информации из компьютера в микропроцессорный блок по скорости.

7. Микропроцессорный блок осуществляет окончательное преобразование информации с целью получения требуемых выходных сигналов в виде цифровых кодов.

Функция  $A(t)$  отражает закономерность пространственного распределения хлопка-сырца раскрытых хлопковых коробочек на участке хлопкового поля при сканировании подсистемой I соответствующего информационного поля, причем длительность  $\tau_{\xi}$ , когда  $A_t = 1$ , отражает размер раскрытой хлопковой коробочки в месте сечения, а длительность  $\tau_{\xi+1}$ , когда  $A_t = 0$ , отражает расстояние между раскрытыми хлопковыми коробочками по координате информационного поля;

Таблица 6.4

*Основные технические характеристики СТЗ*

Технико-экономические показатели СТЗ	Пределы изменения
Питание от бортовой сети ХМ, В	12 ±2,5
Потребляемая мощность, Вт	не более 25
Время одного поперечного опроса подсистемы I, мс	1...2
Время сканирования участка хлопкового поля подсистемой I, с	5...10
Время сканирования участка хлопкового поля подсистемой II, мс	20
Количество сканируемых хлопковых рядов	2; 4
Количество каналов управления рабочими органами ХМ	до 10
Вид выходного сигнала – цифровой, В	0; 9
Разрядность выходного сигнала	8; 16
Габаритные размеры одного канала подсистемы, мм <sup>3</sup>	140×64×105
Вес, кг	не более 3



Для направленного движения ХМ по хлопковому полю используется технологически определенное расположение хлопковых рядов, обеспечивающих соответствующее распределение хлопковых коробочек. Цифровой код междурядья двух соседних рядов информационного поля может быть использован как сигнал управления для направленного движения ХМ по хлопковому полю или предупредительный сигнал об отклонении от требуемого направления движения. Для реализации функции оценки количества и качества сбора хлопка необходим второй канал подсистемы I, обеспечивающий сканирование информационного поля после воздействия на него рабочих органов ХМ. Основные технические характеристики СТЗ приведены в табл. 6.4.

#### **6.6.10. Системы технического зрения для контроля распределения температуры на поверхности (СТЗ КРТ)**

Система предназначена для контроля распределения температуры на поверхности, определения абсолютных значений температур отдельных точек поверхности, выработки сигналов для управления нагревателем.

Область применения СТЗ КРТ – автоматизация процесса вакуумного напыления в установках типа УВН-71 по температуре испарителя, контроля распределения температуры по пластине в процессе отжига, а также контроля эмиссионных спектров излучения плазмы газового разряда при автоматизации процессов плазменного травления и осаждения.

Состав системы отражен на блок-схеме рис. 6.58, в которую входят оптический блок (ОБ), датчик (Д) и устройство аналогового ввода информации (АВ).

Датчик предназначен для преобразования оптического излучения в диапазоне длин волн  $0,4 \dots 1,3$  мкм в электрический сигнал. В качестве преобразователя используется многоэлементное ФПУ типа ЛФ-1024, содержащее  $1024 \times 1$  фотоячеек с шагом 20 мкм и размером ячейки  $19 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

Линейное расположение фотоячеек позволяет контролировать распределение излучения по поверхности излучающего тела с погрешностью, не превышающей разброс по чувствительности и темновым токам. Компенсация этих разбросов, т. е. уменьшение погрешности, обеспечивается схемным решением применения схем ДКВ (разброс темновых токов) и программным способом (разброс по чувствительности).

Режим работы ФПУ задается формирователями фазовых  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и запускающих  $\Phi_0$  импульсов. Временные соотношения между ними позволяют организовать режим прямого считывания (для излучений больших энергий) и режим накопления. Формирователи  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_0$  пред-

ставляют логические схемы с линиями задержки и с транзисторами, работающими в ключевом режиме, на выходе. Частоты  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  находятся в пределах от 100 кГц до 2 МГц.

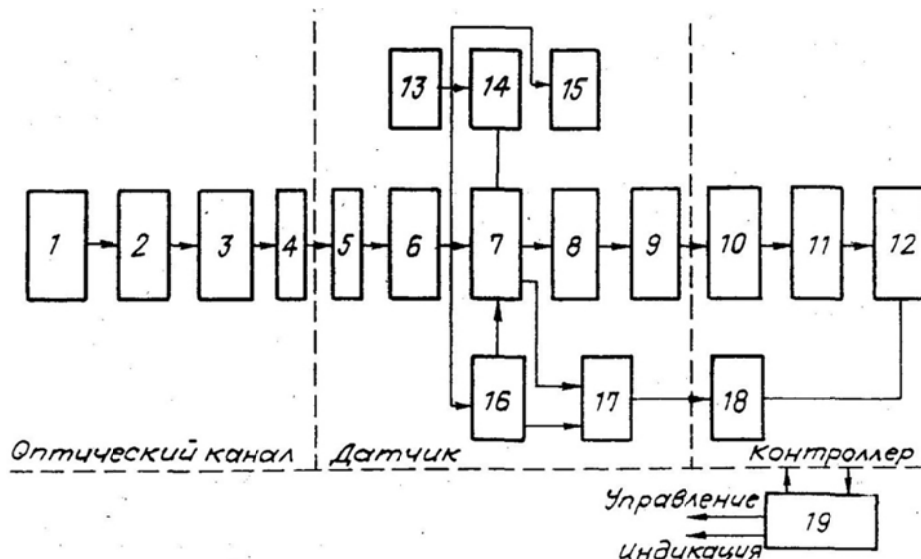


Рис. 6.58. Структурная схема системы контроля температуры:

- 1 – источник излучения, 2 – устройство защиты, 3 – световод,
- 4 – окно из кварцевого стекла, 5 – блок светофильтров, 6 – объектив,
- 7 – МЭПИ, 8 – схема компенсации, 9 – видеоусилитель, 10 – АЦП,
- 11 – передатчик, 12 – БЗУ, 13 – генератор тактовых импульсов,
- 14 – формирователи  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ , 15 – формирователь сигналов выборки и фиксации,
- 16 – формирователь  $\Phi_0$ , 17 – формирователь управляющих сигналов,
- 18 – формирователь адреса, 19 – микроЭвм «Электроника 60»

Видеоусилители выходных видеоканалов собраны на микросхемах серии К544. Конструктивно датчик температуры выполнен в прямоугольном корпусе; габаритные размеры –  $70 \times 80 \times 170 \text{ мм}^3$  с объективом «Гелиос-44». Схемы формирователей видеоусилителей размещены на двух платах размером  $60 \times 70 \text{ мм}^2$ .

Устройство АВ обеспечивает дискретизацию непрерывного сигнала, поступающего с МЭПИ с частотой не более 500 кГц, хранение информации в буферном запоминающем устройстве, емкостью 8 Кбайт, и выдачу содержимого БЗУ в канал ЭВМ «Электроника 60» с частотой 20 кГц. Конструктивно устройство АВ выполнено в модульном варианте и включается в свободное место субблока ЭВМ.

Устройство АВ включает в себя (рис. 6.59) а) дешифратор и регистр адреса (ДША, РГА), б) дешифратор управляющих сигналов (ДШУС), в) буферное запоминающее устройство (БЗУ), г) схему управления БЗУ (СУ БЗУ), д) регистр ФПУ (РГ ФПУ), е) аналого-цифровой преобразователь (АЦП), ж) каналные приемопередатчики (КПП).

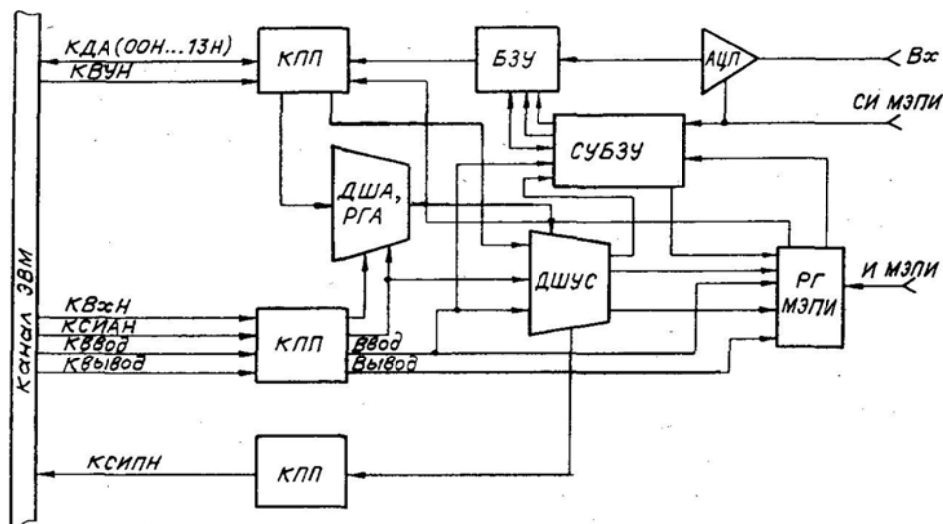


Рис. 6.59. Функциональная схема устройства аналогового ввода

При обращении к устройству АВ через каналные приемопередатчики на вход ДША поступает код адреса по линиям КДА03Н ... КДА13Н, сигнал КВУН, управляющие сигналы КВВОДН, КВЫВОДН, а также сигнал КСИАН. Код дешифрируется схемой совпадения, результат дешифрации, а также младшие разряды 1, 2 запоминаются в адресном регистре по переднему фронту КСИАН. С выходов адресного регистра код поступает на дешифратор управляющих сигналов, который осуществляет выбор конкретного регистра. Сигналы ДШУС и выходные сигналы ВВОД, ВЫВОД поступают на схемы совпадения, на выходе которого вырабатываются соответствующие сигналы.

Центральный процессор осуществляет управление устройством АВ через регистры. Для регистрации быстропротекающего процесса служит БЗУ. Устройство управления обеспечивает прием информации в БЗУ с АЦП и выдачу информации в канал ЭВМ. В режиме «запись» тактирование БЗУ осуществляется синхроимпульсами, поступающими с генератора МЭПИ, в режиме «чтение» – сигналом ВВОД, поступающим с ЭВМ. Регистр МЭПИ предназначен для отображения состояния МЭПИ и входит в состав устройства управления БЗУ. Функционирование устройства АВ происходит под действием управляющей программы (УП), хранящейся в памяти ЭВМ.

По команде с ЭВМ происходит перезапись РГ МЭЛИ, в БЗУ устанавливается режим «запись». По переднему фронту сигнала СИ МЭПИ (рис. 6.59) осуществляется преобразование аналоговой информации, поступающей на вход АЦП, и с некоторой задержкой запись числа с выхода АЦП в БЗУ.

Следующей группой команд производится опрос и анализ состояния РГ МЭПИ. Если его состояние равно «1», то передача аналоговой

информации с МЭПИ закончилась. При установке РГ МЭПИ в состояние «1» аппаратно запрещается запись в БЗУ, обнуляются счетчик и регистр адреса БЗУ, устанавливается режим «чтение».

По команде с ЭВМ происходит обращение к РГ БЗУ и сигналом ВВОД, поступающим с ЭВМ, происходит считывание информации в канал ЭВМ. Число считанных байтов регистрируется программным счетчиком. По окончании считывания информации УП заканчивает свою работу.

Пуск УП осуществляется оператором в произвольный момент времени, вследствие чего возможны «неблагоприятные» ситуации, заключающиеся в частичной потере информации, поступающей на вход АЦП с МЭПИ. Данное явление исключается программным путем.

ОП предназначен для вывода изображения источника оптического излучения к датчику. Разработан для работы с вакуумной установкой напыления УВН-71. Источником излучения в ней служит испаритель, выполненный в виде лодочки или плоской пластины, набранной из вольфрамовых проволок. В рабочем режиме испаритель находится в вакууме порядка  $10^{-5} - 10^{-6}$  мм.рт.ст. Визуальное наблюдение за ним в период напыления подложки затруднено из-за запыленного кварцевого стакана, окружающего испаритель. Кроме того, ограниченное вакуумное пространство и отсутствие дополнительных вакуумных вводов делают невозможным размещение датчика в непосредственной близости от испарителя.

Таким образом, вместе с задачей вывода изображения испарителя на МЭПИ датчика, расположенного за пределами вакуумного пространства, необходимо решить задачу защиты оптических средств от напыляемого материала. В разработке учтены эти соображения и создано статическое устройство защиты от напыления.

#### Технические характеристики

Габаритные размеры оптического блока для УВН-71: датчика, мм <sup>3</sup>	70×80×170
АВ – половина платы ЭВМ «Электроника 60»	
Диапазон контролируемых температур, °С	600...2500
Пространственное разрешение для УВН-71 более 10 точек на мм длины испарителя	
Контролируемый размер излучателя, мм	50...70
Точность определения температуры, %	± 1
Скорость измерений, изм/с	до 100
Базовая микроЭВМ – «Электроника 60».	

### 6.6.11. Системы технического зрения для робототехнических комплексов, обслуживающих подвесные и ленточные конвейеры

При построении автоматизированных конвейерно-складских комплексов, робототехнологических участков окраски и сборки машин часто возникает необходимость в распознавании типов деталей, перемещаемых подвесным конвейером. Ниже описывается вариант такой СТЗ. Детали 1 (например, облицовка тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных машин, двигателей и т. п.) подвешиваются в произвольном порядке на конвейере 2 на сцепках 3 (рис. 6.60).

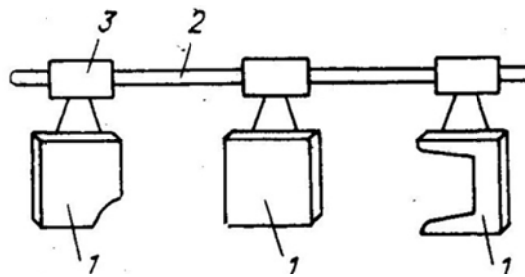


Рис. 6.60. Транспортировка деталей подвесным конвейером

Для определения типа деталей, перемещаемых конвейером, разработаны различные варианты систем очувствления. Так как перемещаемые детали являются объемными и зачастую не различаются своими плоскими проекциями, то при синтезе СТЗ необходимо располагать эти системы с учетом пространственной ориентации их оптических осей.

Рассмотрим СТЗ, предназначенную для автоматического адресования деталей облицовки трактора К-701, транспортируемых подвесным толкающим конвейером ПТК-4 на главный сборочный конвейер. Основные задачи, решаемые системой очувствления: организация учета изделий, перемещаемых подвесным толкающим конвейером; распределение грузопотоков между главным и вспомогательными конвейерами путем задания адреса склада в системе автоматического адресования, обеспечение комплектности доставки деталей на сборку, осуществление обратной связи по номенклатуре деталей на ход технологического процесса.

Детали облицовки трактора К-701 перемещаются к главному конвейеру 1, главным транспортным 2 и вспомогательным 3 конвейерами. В различных точках транспортного конвейера установлены системы очувствления, информация поступает в систему автоматического адресования и управляющую ЭВМ верхнего уровня. Главный транспортный конвейер заканчивается промежуточными складами деталей. В функции системы очувствления входит коммутация стрелки привода соответствующего склада при подходе детали заданного типа.

Рецептор СТЗ выполнен в виде матрицы 1, фотоприемников 2, установленных с возможностью изменения положения в вертикальной плоскости и поворота вокруг осей, перпендикулярных оптической оси датчика. Фотодатчики освещаются осветителями, расположенными на аналогичной матрице. На тех участках, где размеры зоны размещения матриц ограничены, матрица осветителей крепится непосредственно к опорной колонне конвейера. При этом формирование полной матрицы признаков объектов производится по другим линиям проектирования (рис. 6.61, где 1 – осветители, 2 – фотоприемники, 3 – сцеп, 4 – транспортируемая деталь).

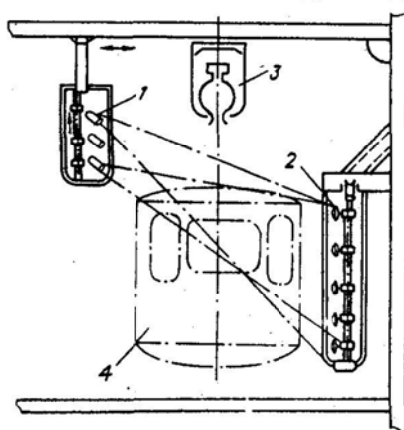


Рис. 6.61

Принцип работы заключается в том, что деталь подвешена на сцепе с помощью цепей. В центре всех сцепов установлен металлический штырь, посередине матрицы в ее верхней части размещен индуктивный датчик. При прохождении середины сцепа мимо индуктивного датчика на его выходе формируется сигнал, по которому производится считывание кода с фотоприемников. Полученный код поступает в блок обработки информации, и на его  $n$ -м выходе появляется сигнал, соответствующий  $n$ -му типу детали. Полученный сигнал усиливается и поступает на привод стрелки  $n$ -го склада. Если код, полученный с фотодатчиков, не соответствует ни одному из кодов, сформированных на этапе обучения системы очувствления, то на резервном выходе блока обработки информации появляется сигнал, по которому включается стрелка привода резервного пути, и деталь повторно проходит мимо системы очувствления. Если при повторном распознавании деталь вновь не распознана, то она направляется в резервный склад, где затем идентифицируется оператором.

В состав СТЗ входят блоки: фотоприемников и осветителей, обработки информации, формирователей и синхронизации, усилителей передачи, стабилизированные источники питания. Конструктивно система очувствления выполнена в виде металлического шкафа, в котором рас-

полагается кассета с блоком обработки информации, а также блоками формирователей, синхронизации и усилителей сигнала. Кассета соединена с блоками осветителей, фотоприемников и линией связи с ЭВМ.

Для совместной работы с окрасочными роботами РБ-211, «Контур-002», «Колер» разработана система очувствления РА-1Р, которая предназначена для распознавания деталей, перемещаемых подвесным конвейером, и переключения программ окраски робота. На рис. 6.62 приведена структурная схема системы очувствления РА-1Р окрасочного робота. Перед началом работы оператор с пульта управления 1 с помощью блока настройки 2 проверяет настройку каждой пары осветитель – фотоприемник. Если все пары настроены, то система переводится в рабочий режим. При входе детали в зону распознавания срабатывает индуктивный датчик 3, фиксирующий прохождение середины сцены, на котором подвешена деталь, мимо середины матрицы рецептора. Сигнал с индуктивного датчика поступает на осветители 4, которые формируют короткий (0,25 с) световой импульс. Информация, считанная с фотоприемников 5, заносится в регистр 6 и в виде параллельного кода поступает на блок обработки информации 7, где производится определение типа детали, и код детали записывается в буферную память 8, с дальнейшей подачей на вход переключения программ окрасочного робота. Этот же сигнал с блока обработки информации поступает на блок счетчиков, где производится подсчет деталей по классам. Для управления окрасочным роботом сигналы с выхода системы очувствления подаются на входной разъем устройства управления робота.

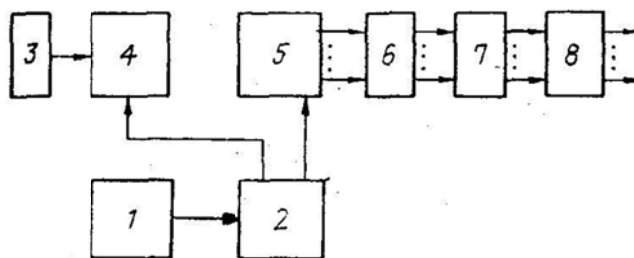


Рис. 6.62. Структурная схема системы РА-1Р

При традиционном методе определения ориентации над лентой конвейера устанавливается телекамера, производится считывание полного изображения объекта, которое затем обрабатывает ЭВМ. Это усложняет систему очувствления и делает ее очень дорогой. Разработан метод уменьшения числа возможных положений детали, перемещаемой ленточным конвейером. Для этого вплотную к ленте конвейера устанавливают стопор. Деталь, подойдя к стопору, под действием сил трения начинает разворачиваться, пока не займет одно из возможных

устойчивых положений. При этом задача распознавания и определения ориентации детали значительно упрощается и может быть решена с помощью СТЗ, образующих нерегулярную матричную структуру.

Универсальность таких СТЗ определяется типом используемого рецептора и возможностями робота. Стоимость и сложность оцувствленного робота в целом зависит от числа датчиков сенсорной системы, числа требуемых степеней подвижности робота и типа его управления.

Рассмотрим классификацию плоских заготовок, позволяющую по форме детали определять число датчиков рецептора, число степеней подвижности робота и тип его системы управления, обеспечивающей совместную работу с системой оцувствления. Все плоские заготовки разделены на три класса.

К первому у классу отнесены заготовки, число устойчивых положений которых  $N \leq 3$ . Для построения робототехнического комплекса (РТК) в этом случае могут быть использованы простейшие роботы с цикловыми системами управления (МП-9С, МП-11, РФ-202М). Для захвата деталей, имеющих 2 или 3 устойчивых положения, робот с цикловой системой управления необходимо оснащать специальными и захватными модулями, обеспечивающими разворот захвата на данный фиксированный угол. При этом для однозначной ориентации деталей захват должен выводиться в точку, являющуюся центром окружности, построенной на центрах тяжести возможных положений детали.

Ко второму классу относятся заготовки, число возможных положений которых  $N > 3$  и конечно. При построении РТК для работы с такими заготовками необходимо использовать робот с позиционной системой управления.

К третьему классу относятся заготовки, число устойчивых положений которых бесконечно. Для работы с такими заготовками системы оцувствления необходимо строить на базе рецепторов с регулярной структурой и обработкой информации на микроЭВМ, а робот должен быть оснащен следящей системой управления.

В каждом классе детали делятся на подклассы по числу устойчивых положений  $N$  и числу датчиков  $n$  рецептора, необходимых для различения этих положений. Первый класс разбит на два подкласса: первый  $N = 1$  и  $n = 0$  и второй  $N = 2; 3$  и  $n = 1; 2$ . Детали, относящиеся к первому подклассу, не требуют применения систем оцувствления, так как имеют одно устойчивое положение. Для деталей второго подкласса требуется не более двух датчиков рецептора.

Второй класс делится на три подкласса. Наиболее распространены детали первого подкласса с числом устойчивых положений  $N = 4...8$ . Число датчиков рецептора при этом  $2 \leq n \leq 7$ . Детали второго подкласса



( $N = 9 - 16$ ) встречаются крайне редко, а детали, относящиеся к третьему подклассу ( $N > 17$ ), не обнаружены. Детали в подклассах разделены на группы. Отнесение детали ко второй группе в соответствующем подклассе свидетельствует о необходимости выполнения ротации захвата ( $\varphi = 0 - 180^\circ$ ) для обеспечения однозначной ориентации детали. Предложенная классификация позволяет формулировать требования к системе очувствления и применяемому роботу, а также позволяет производить кодирование деталей трехзначным кодом, в котором первый знак соответствует классу, второй – подклассу, а третий – типу детали. Рассмотрим построение систем очувствления, проводимое с использованием предложенной классификации.

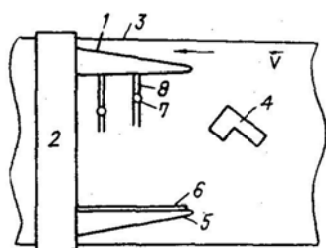


Рис. 6.63

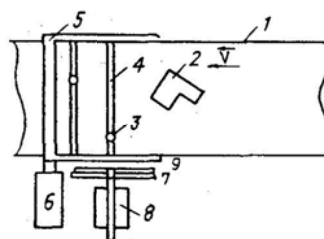


Рис. 6.64

На рис. 6.63. показана система очувствления, ДООИ которой размещены непосредственно в охвате манипулятора. Захват 1 с приводом 2 примыкает к ленте конвейера 3, по которому перемещается деталь 4. Захват оснащен губками 5. В одну из этих губок захвата встроен датчик усилия 6. Рецептор выполнен в виде отражательных оптронных пар 7, установленных на направляющих 8 с возможностью перемещения в горизонтальной плоскости. Выходы датчиков рецептора и датчика усилия соединены с блоком обработки информации, подключенным к системе управления роботом и блоком управления приводом охвата.

В исходном состоянии схват находится в центре ленты конвейера и примыкает к ней. При попадании детали в зону действия датчиков рецептора с задержкой, необходимой для принятия деталью устойчивого положения у задней стенки охвата, формируется команда на сжатие губок схвата, которое прекращается по сигналу с датчика усилия, и одновременно производится считывание информации с датчиков рецептора. В блоке обработки информации производится определение положения детали в схвате и выдается команда на систему управления роботом для обработки программы, соответствующей данному положению детали.

Использование системы очувствления, когда рецептор совмещен со хватом робота, в некоторых случаях нецелесообразно, так как удлиняется цикл работы робота. Для уменьшения времени цикла разработан ряд авто-

номных систем оцувствления, в которых процесс определения ориентации детали и манипулирование разнесены во времени. В этих системах рецептор системы оцувствления располагается автономно. На рис. 6.64. показан вариант реализации такой системы оцувствления. Над лентой конвейера 1, по которой перемещается деталь 2, размещен рецептор, выполненный в виде отражательных оптронов 3, расположенных на направляющих 4. Датчики рецептора установлены с возможностью изменения положения в горизонтальной плоскости. Направляющие закреплены на раме 5, оснащенной приводом 6 поворота рамы. На толкателе 7, оснащенный приводом 8, размещен датчик усилия 9. Цикл работы данного устройства аналогичен циклу работы устройства, показанного на рис. 6.64. После занятия деталью устойчивого положения она фиксируется толкателем, а для обеспечения захвата детали роботом 5 с размещенными на ней датчиками рецептора отводится от ленты с помощью привода 6.

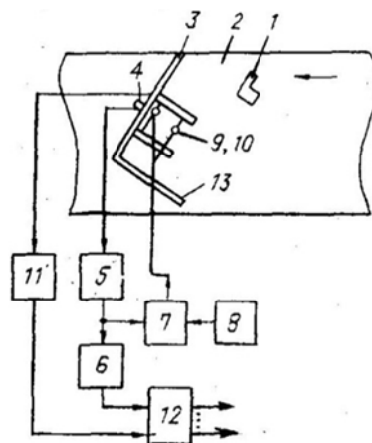


Рис. 6.65

Наиболее широкими функциональными возможностями обладает система оцувствления, показанная на рис. 6.65. Деталь 1, перемещаемая лентой конвейера 2 доходит до наклонного упора 3, примыкающего к ленте и под действием сил трения начинает разворачиваться. Одновременно с этим деталь скользит вдоль наклонного упора, при этом она занимает одно из возможных устойчивых положений. При подходе детали к индуктивному датчику 4 последний срабатывает. Сигнал индуктивного датчика подается на вход формирователя импульсов 5 и поступает на вход элемента задержки 6 и ключа 7, который подключает источник питания 8 к блоку осветителей 9. Сигналы с блока фотодатчиков 10 подаются на блок формирователей импульсов 11, выходы которых подключены к входам дешифратора 12. Ко входу разрешения считывания дешифратора подключен вход элемента задержки. Величина задержки выбирается больше времени переключения ключа и срабатывания блока фотодатчиков, а также освети-

телей. Код блока фотодатчиков поступает на дешифратор, и на одном из его выходов, соответствующих номеру положения детали, появится сигнал «1», за счет чего включается соответствующая программа работы робота. На позиции захвата деталь останавливается с помощью стопора 13. Оптопары осветитель – фотодатчик выполняются в отдельных корпусах, имеющих возможность перемещения над лентой конвейера.

Рассмотренный подход к построению систем оцувствления позволяет создавать такие системы не только для плоских, но и объемных деталей.

### **6.6.12. Системы технического зрения для контроля параметров оптических деталей**

Как известно, для определения формы оптических изделий – зеркал, объективов – наиболее точным способом измерения является интерференционный. Он заключается в интерференции волнового фронта опорного лазерного излучения с измеряемым, деформированным в соответствии с пространственным распределением поверхности измеряемого изделия. По полученным искривлениям интерференционной картины, а также с учетом известных соотношений и масштаба оптической системы определяется отклонение формы измеряемого изделия от заданной. При разработке более совершенных и эффективных интерферометров необходимо автоматизировать ввод и обработку интерферограмм в ЭВМ. Эта задача частично решается при съеме и вводе интерферограмм с фотоносителей и полностью – при непосредственном вводе интерферограмм в реальном масштабе времени. Для этого на основе интегральных МДП-фотодиодных матриц разработаны СТЗОП-1 и ФЭИ-1.

ОП-1 предназначена для преобразования двумерной оптической информации в электрические сигналы и ввода их в ЭВМ. Функциональная схема ОП-1 приведена на рис. 6.66.

Коллимированный источник света (КИС) освещает фотопленку (Ф). Проекционный объектив (О) переносит изображение необходимого участка интерференционной картины на поверхность интегральной МДП-фотодиодной матрицы (ИФМ), которая размещена в выносной оптоэлектронной головке (ОЭГ). Синхронизация устройства осуществляется задающим генератором (ЗГ). Входные сигналы фотоячеек по 16 строкам подаются через многоканальный буферный усилитель (БУ) на входы устройства. Кольцевым регистром сдвига (КРС) формируются импульсы коммутации ИФМ по столбцам. С помощью регулируемого формирователя временного интервала (ФВИ) обеспечивается изменение времени накопления (экспозиции). Стирание ИФМ осуществляется по заднему фронту последнего импульса коммутации КРС. В преобразователе предусмотрена автоматическая и ручная регулировка фоточувствительности, что устанавливается переключением

чателем «АРЧ – ручная регулировка». Во втором режиме фоточувствительность ИФМ устанавливается с помощью переменного потенциометра «Чувствительность». Для автоматической регулировки формируется сигнал управления задающим элементом (ЗЭ), эквивалентное сопротивление которого изменяется напряжением. Сумматором (С) и амплитудным детектором (АД) выделяется максимальная амплитуда сигналов фотоячеек по всей ИФМ, которая в блоке сравнения (БС) сравнивается с заданной. Величина максимальной амплитуды задается потенциометром «Подстройка АРЧ». При сравнении формируется сигнал рассогласования, который изменяет сопротивление ЗЭ и соответственно время экспозиции ИФМ таким образом, чтобы максимальный сигнал фотоячеек не был меньше заданного. При этом обеспечивается диапазон регулирования 46 дБ.

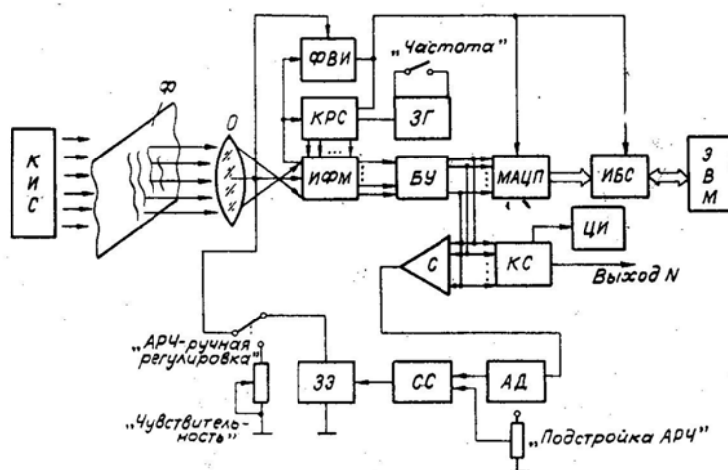


Рис. 6.66. Функциональная схема оптоэлектронного преобразователя ОП-1

С помощью коммутатора строк (КС), переключателя «Выбор строки»: «1-8» ... «9-16», можно на гнездо «Выход N» подать сигнал с одной строки. Номер выбранной строки высвечивается на цифровом индикаторе (ЦИ).

С выхода БУ сигналы по 16 каналам последовательно по столбцам поступают на многоканальный АЦП, интерфейсный блок сопряжения БС и на ЭВМ. Обработка информации с преобразованной интерферограммы по определенному алгоритму, идентификация полос, вычисление координат центров, а также расчет топограммы поверхности измеряемого оптического изделия производятся в ЭВМ.

#### Основные технические характеристики

Количество площадок съема оптического сигнала интегральной МДП-фотодиодной матрицей МФ-16	256
Область спектральной чувствительности, мкм	0,4+1,1

Максимальная скорость преобразований, кадр/с	$2 \times 10^4$
Диапазон регулирования в режиме автоматической регулировки фоточувствительности, $5 \times 10^{-10} \dots 1 \times 10^{-7}$ Вт	1...200 лк
Выходное напряжение, В	0...5
Погрешность преобразования при 50%-м изменении выходного сигнала, %	3
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	
электронного блока	270×110×2
оптоэлектронной головки	80×35×140
Масса, кг	
электронного блока	2
оптоэлектронной головки	0,2

Устройство имеет выходы одновременно по 16 каналам для ввода в ЭВМ М-2000.

Система технического зрения ФЭИ-1 предназначена для определения топограммы поверхностей оптических изделий в реальном масштабе времени; ФЭИ-1 основана на интерферометрии радиального сдвига, которая заключается в разделении волнового фронта, отраженного от контролируемой поверхности, на две части, в изменении апертуры одной части и их объединении. Такое построение интерферометра обеспечивает высокую устойчивость к вибрациям. Для повышения отношения сигнал-шум в электронной части интерферометра наиболее целесообразно использовать фазовые методы выделения и обработки сигнала.

Для реализации фазовых методов в ФЭИ-1 производятся периодическая модуляция оптической разности хода с помощью пьезокерамического модулятора и регистрация распределения фаз динамической интерферограммы относительно какой-либо точки ее. В ФЭИ-1 использованы интегральные МДП-фотодиодные матрицы МФ-14 (ФПУ-14) в режиме прямого детектирования.

Устройство содержит формирователь телевизионного изображения интерферограммы и имеет выход на ЭВМ «Электроника 60», где производится расчет топограммы оптической поверхности. Функциональная схема ФЭИ-1 приведена на рис. 6.67.

Оптико-механическая система (ОМС) фотоэлектрического интерферометра формирует динамическую интерференционную картину, которая с помощью светоделительной призмы (СП) подается соответственно на интегральные МДП-фотодиодные матрицы измерительного и опорного каналов ИФМИ, ИФМО. Последние включены в режиме прямого детектирования, причем ИФМО не коммутируется, и сигнал

снимается с одной фотоячейки. Модуляция интерференционной картины производится пьезокерамическим модулятором (ПМ) с закрепленным на нем эталонным зеркалом на резонансной частоте. Амплитуда колебаний зеркала составляет  $\pm 3$  мкм. Модуляция интерференционной картины, выделение информации о разности фаз сигнала обеспечивают нечувствительность к изменениям амплитуды сигнала, упрощают преобразование фазы в цифровую форму для ввода ее в ЭВМ и алгоритм расчета топограммы. При этом возрастают требования к обеспечению идентичности амплитудно-фазочастотных характеристик трактов выделения, усиления и обработки информационного и опорного сигналов.

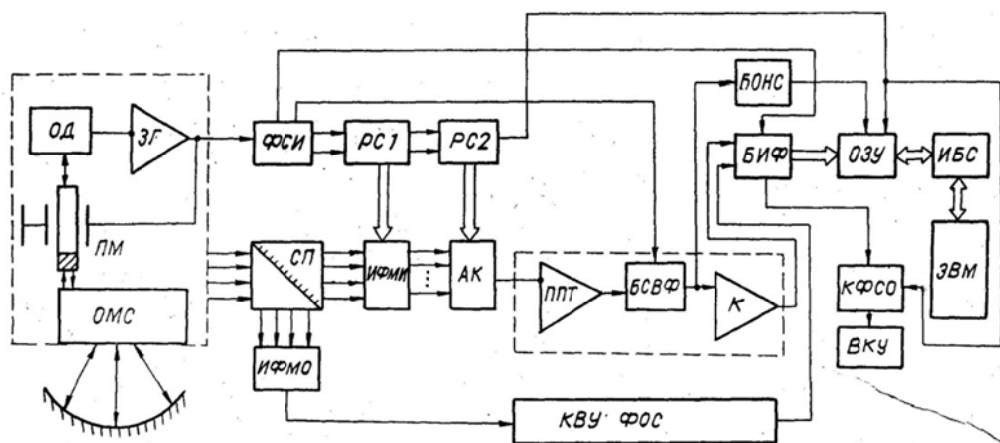


Рис. 6.67. Функциональная схема фотоэлектрического интерферометра ФЭИ-1

Синхронизация работы ФЭИ-1 осуществляется задающим генератором (ЗГ), который вырабатывает стабильные по частоте и амплитуде синусоидальные колебания частотой 2 кГц. Для обеспечения стабильности амплитуды колебаний модулирующего зеркала ЗГ охвачен отрицательной обратной связью. Амплитуда колебаний зеркала снимается с помощью оптопары светодиод – фотодиод и диафрагмы (ОД), установленной на ПМ. Этот сигнал подается и на запуск блока развертки (БР), который содержит формирователь синхронизирующих импульсов (ФСИ) регистров сдвига (РС1, РС2) и вырабатывает сигналы коммутации ИФМИ и аналогового коммутатора (АК) строк; ФСИ вырабатывает необходимые тактовые и синхроимпульсы по вершинам синусоидального колебания ЗГ для управления РС1 и РС2. С выхода АК сигнал подается на активный полосовой преобразователь тока (ППТ). Нагрузка ИФМ по постоянному току для получения большего отношения сигнал-шум выбрана высокоомной.

Модулированный сигнал в диапазоне частот 10...100 кГц подается на блок стробирования и высокочастотной фильтрации, где производится дальнейшая обработка и фильтрация сигнала. Выделенный сигнал посту-

пает на коммутатор (К) и блок определения наличия модулированного сигнала (БОНС) в ячейках ИФМИ. Компаратор формирует прямоугольные импульсы в моменты перехода через нуль модулированного сигнала. Канал выделения, усиления и фильтрации опорного сигнала выполнен аналогично. Величина фазы между опорным и измерительными сигналами определяется в блоке измерения фазы (БИФ). Для повышения точности измерения фазы производится усреднение за 8 периодов во время прямого и обратного ходов зеркала ПМ. Полученные значения фазы за время опроса каждой ячейки записываются в ОЗУ и далее через интерфейсный блок сопряжения (БС, платы И2) вводится с ЭВМ «Электроника 60». Для удобства настройки и эксплуатации ФЭИ-1 предусмотрен канал формирования сигналов отображения (КФСО).

Программное обеспечение ЭВМ, выполненное на языках Бейсик, Квейсик и Ассемблер, включает программы: обслуживания и управления режимами работы ФЭИ-1, расчета разности фаз, апертуры, порядков интерференции, а также топограммы. Электропитание ФЭИ-1 осуществляется непосредственно от блока питания ЭВМ «Электроника 60».

#### Основные технические характеристики

Максимальное отношение диаметра к радиусу кривизны контролируемой поверхности	1: 5
Среднеквадратическая погрешность определения топограммы менее $\lambda/60$ поверхности ( $\lambda$ – длина волны лазерного излучения ( $\lambda = 0,628$ мкм))	
Время съема информации, с	0,512
Время расчета топограммы, мин	1...3
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	
электронного блока	70×220×250
выносных оптоэлектронных головок	120×140×80
Масса, кг	
электронного блока	6
оптоэлектронных головок	0,3

Технологический процесс (ТП) получения заготовок является наиболее важным при производстве световолокна, так как от него зависят качественные характеристики выходной продукции.

Несомненно, что наиболее важным узлом СУ ТП, определяющим эффективность последней, является устройство преобразования диаметра заготовки. Ввиду того, что в раскаленной зоне имеется высокотемпературное пламя горелки, это устройство должно обеспечивать работу в

условиях помех. Кроме того, оптическая система должна иметь минимальные установочные габариты, чтобы не мешать нормальной работе установки. Для измерения диаметра раскаленной зоны заготовки наиболее целесообразно использовать ее собственное излучение. При этом возможно одновременно измерять и температуру.

Разработано сканисторное устройство ИДЗ-1, которое определяет и индицирует в цифровой форме диаметр, в аналоговой форме – температуру раскаленной зоны заготовки, формирует и выдает сигнал, пропорциональный отклонению диаметра заготовки от номинальной величины на автоматическую СУ ТП.

При разработке устройства ИДЗ-1 использован адаптивный метод формирования информационного сигнала со следящим и стабилизированным порогом. Кроме того, использован метод компенсации погрешности преобразований коррекцией напряжения развертки. Дополнительная фоновая подсветка сканисторов в данном случае не нужна, так как она получается автоматически за счет излучения от пламени газовой горелки, окружающего область раскаленной зоны заготовок.

#### Основные технические характеристики

Диапазон преобразования диаметра, мм	от 2 до 20
Погрешность преобразований, %	±1
Диапазоны освещенности, лк	100...3000
Быстродействие, опросов/с	500
Потребляемая мощность, Вт	20
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	300×100×300
Масса, кг	4

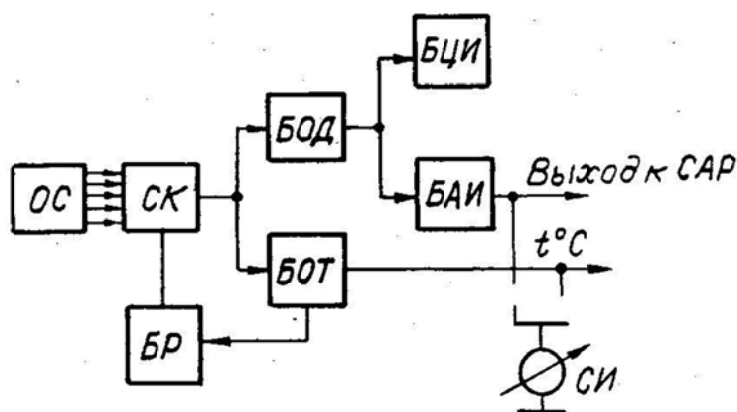


Рис. 6.68. Функциональная схема устройства ИДЗ-1

Функциональная схема устройства ИДЗ-1 приведена на рис. 6.68. Изображение раскаленной кварцевой трубки-заготовки фокусируется оптической системой (ОС) в плоскости фоточувствительного слоя сканисто-



ра (СК), опрос которого осуществляется блоком развертки (БР). Сигнал со сканистора подается на блоки определения диаметра (БОД) и определения температуры (БОТ); БОД вырабатывает прямоугольные импульсы, длительность которых пропорциональна ширине освещенности участка сканистора и с учетом коэффициента увеличения оптической системы диаметру трубки заготовки. Эти импульсы подаются на блок цифровой индикации (БЦИ), блок аналоговой индикации (БАИ) и выходной разъем прибора БЦИ производит усреднение длительности импульсов за 100 периодов опроса и индикации среднего значения в цифровой форме.

В БАИ происходят преобразование длительности информационного импульса в напряжение и сравнение полученного напряжения с эталонным. Эталонный размер устанавливается ручкой «Установка диаметра». Размерный сигнал подается на стрелочный индикатор и систему автоматического управления диаметром в качестве сигнала управления.

Блок определения температуры вырабатывает напряжение, пропорциональное яркости излучения раскаленной заготовки, которое управляет скоростью нарастания напряжения опроса с БР, чтобы при увеличении яркости уменьшалось время опроса сканистора. Таким образом, достигается компенсация увеличения длительности информационного импульса при увеличении яркости. Поскольку яркость изделия однозначно связана с температурой, по величине выходного сигнала БОТ можно судить о температуре трубки. В связи с этим выходной сигнал БОТ подается на стрелочный индикатор и выходной разъем « $t^{\circ}C$ ».

### **6.6.13. Системы технического зрения для раскрыя материала**

Система технического зрения (тип БИТ-21) предназначена для подготовки управляющих программ раскрыя материала путем их автоматической генерации по параметрам, получаемым из телевизионного изображения технологической выкройки, – шаблона размещения ее копий на поле раскрыя. Область применения системы – в составе технологического оборудования с числовым программным управлением для раскрыя материалов различного типа. Структурная схема СТЗ, представленная на рис. 6.69, состоит из следующих узлов.

Датчик видеосигнала матричный (ДВМ). Построен на среднеформатной ПЗС-матрице К1200ЦМ1 с разрешающей способностью 144×232 элемента. Параметры видеосигнала соответствуют ГОСТ 7845–79. Габаритные размеры датчика – 180×75×35 мм. Потребляемая мощность – не более 4,5 Вт.

Осветительное устройство (ОУ). Позволяет создавать на рабочей сцене на расстоянии до 200 мм освещенность до 2500 лк. Потребляемая мощность – 1000 Вт.

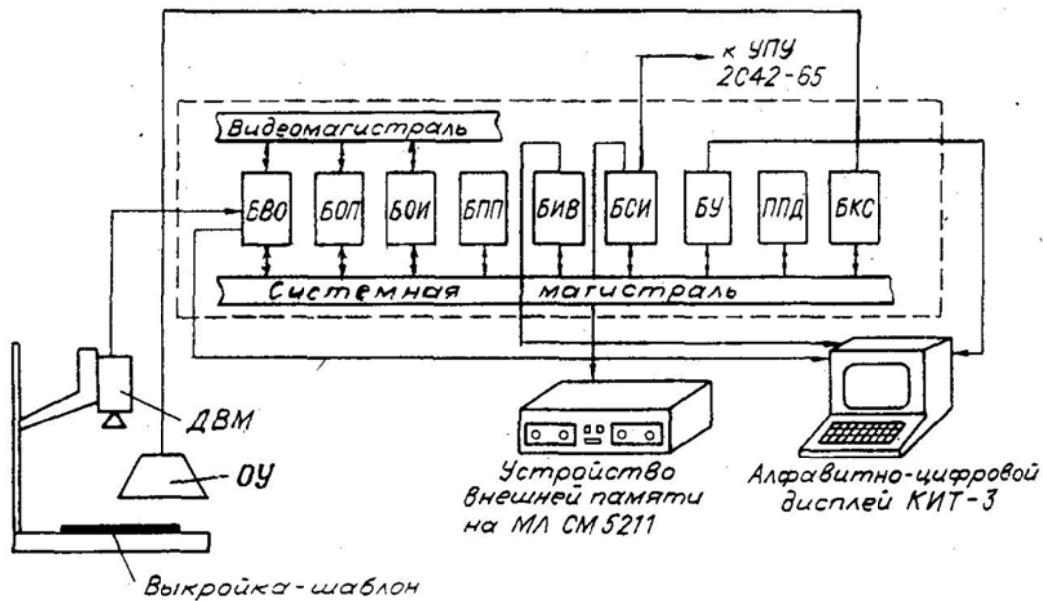


Рис. 6.69. Структурная схема АРМ подготовки УП раскрытия материалов на базе СТЗ «БИТ-21»

Пульт обучения – клавиатура с однострочным дисплеем. Габаритные размеры пульта –  $348 \times 190 \times 70$  мм<sup>3</sup>.

Блок управления (БУ) – микроЭВМ. Процессор КМ1801ВМ2. Объем ПЗУ 16 К слов.

ОЗУ – 4 К слов. Язык программирования – «BASIC-VISION».

Блок оперативной памяти (БОП). Предназначен для оперативного хранения информации. Имеет 3 программно управляемых энергонезависимых банка по 4 К слов каждый.

Блок постоянной памяти (БПП). Предназначен для длительного хранения констант, программ, обеспечивающих функционирование системы технического зрения.

Блок ввода и отображения (БВО). Формирует окно, ограничивающее вводимое изображение, производит бинаризацию видеoinформации по одному из 256 уровней, вводит один полукадр изображения за 20 мс. Имеется возможность контроля работоспособности функциональных узлов блока в видеоконтрольном устройстве.

Блок стандартных интерфейсов (БСИ). Предназначен для связи СТЗ с внешними устройствами, имеющими интерфейсы типа ИРПС и устройствами внешней памяти на кассетной магнитной ленте СМ5211.

Блок обработки изображения (БОИ). Предназначен для быстрой (в процессе развертывания изображения) фильтрации, определения связности и вычисления первых начальных моментов бинаризации изображения.

Полупроводниковый диск (ППД). Предназначен для временного хранения, записи и воспроизведения информации емкостью 512 Кбайт.

Блок коммутации осветителей (БКС). Предназначен для питания и управления осветительными устройствами и датчиками видеосигнала. Алгоритм работы СТЗ следующий:

1. Перемещением датчика на стойке устанавливается масштаб изображения, соответствующий размерам шаблона.
2. Вместо шаблона в память вводится изображение эталонного объекта с известными размерами, вычисляются масштабные коэффициенты, которые в дальнейшем служат для перевода пикселей в миллиметры.
3. Вводится изображение шаблона, и генерируется цепной код – упорядоченный массив координат контурных точек.
4. На основании анализа кривизны контура создается массив номеров особых точек – максимумов кривизны, перегиба, измерения кривизны.
5. Фрагменты контура между особыми точками аппроксимируются дугами или прямыми, минимизирующими среднеквадратическое отклонение. Создается файл описания шаблона.
6. На основании файла описания шаблона генерируется программа раскроя одного шаблона.
7. На диске хранятся описания и программы раскроя нескольких шаблонов, которые вызываются программой размещения шаблонов на настиле. В интерактивном режиме на экране графического дисплея производится установка шаблонов на настиле. Программа исключает пересечение, шаблонов.
8. При выходе из программы установки шаблонов генерируется файл, содержащий координаты начальных точек реза на настиле и имена соответствующих подпрограмм раскроя отдельных шаблонов. На основе этих данных генерируется программа раскроя настила.
9. По каналу ИРПС программа передается в стойку ЧПУ и может быть запущена на выполнение или сохранена на перфоленте для последующей работы.

Программное обеспечение написано на языках Фортран, Си, макроАссемблер и работает в дисковой операционной системе RT-11.

#### Технические характеристики

Точность изготовления выкройки, мм		$\pm 1; \pm 0,5$
Формат вводимого изображения, мм	не менее	400×400
Зазор между выкройками на поле раскроя, мм		0...5
Время подготовки промежуточной УП на один шаблон, мин		5
Режим общения «оператор – АРМ УПР»		диалоговый

Ввод данных – с терминала или накопителя на магнитной ленте.

Сопряжение с УЧПУ основного технологического оборудования – по каналу ИРПС.

### 6.6.14. Системы технического зрения на основе бесконтактных чувствительных линеек или поверхностей

Системы технического зрения, реализованные на основе бесконтактных чувствительных поверхностей, обеспечивают оценку угла ориентации и координат центра формы объекта манипулирования в рабочей зоне робота. В этих СТЗ основным элементом являются информационные линейки или поля (ИЛП), схемы применения которых даны на рис. 6.70: схема расположения одной линейки (рис. 6.70, а), двух линеек (рис. 6.70, б) и чувствительной поверхности (рис. 6.70, в).

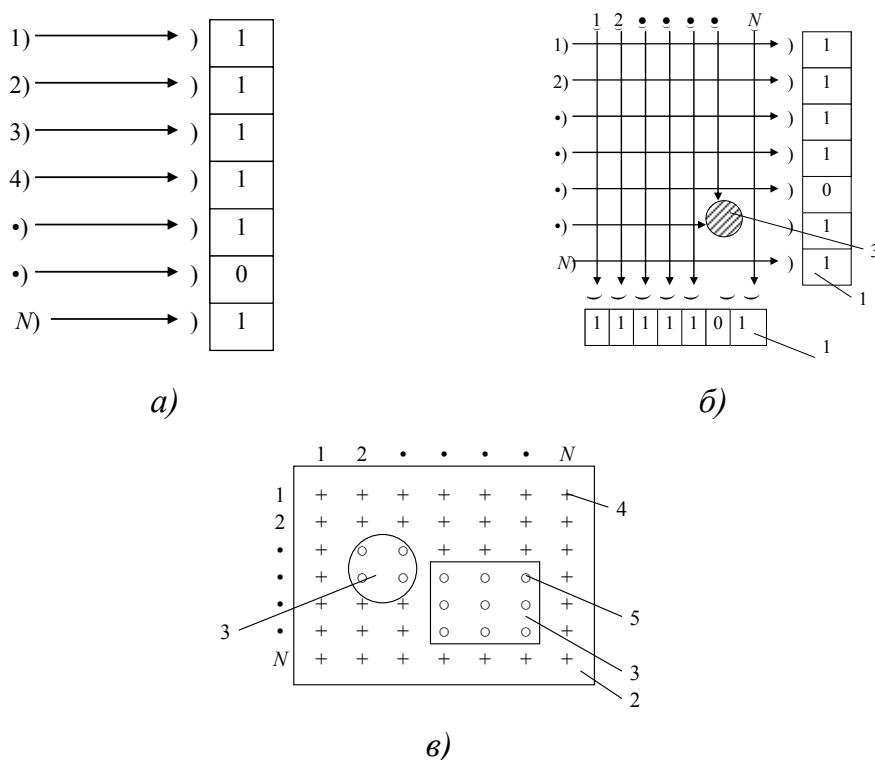


Рис. 6.70. Схема применения двухпозиционных датчиков для анализа расположения объекта на плоскости:  
 а – при одной неизвестной координате объекта,  
 б – при двух неизвестных координатах объекта,  
 в – при неизвестных координатах, форме и ориентации объектов,  
 1 – информационная линейка, 2 – чувствительная поверхность,  
 3 – объект манипулирования,  
 4, 5 – фотоприемники в состоянии «1» и «0» соответственно

Первая схема позволяет оценить одну координату объекта, вторая – две координаты и угол ориентации объекта, а третья – две координаты, угол ориентации и форму объекта. На рисунках показаны способы оценки линейных координат и формы объекта.

Первая схема реализована следующим образом: в направлении оси  $x$  устанавливаются  $N$  фотоприемников (например фотодиодов), и каждому фотоприемнику ставится в соответствие определенная координата  $x$ , ( $i$  – номер фотоприемника), которая запоминается в памяти СТЗ либо вычисляется в зависимости от номера фотоприемника, имеющего состояние «0». Эту же информацию можно получить, сканируя одним фотоприемником данное направление. Зная скорость сканирования, можно легко определить координаты объекта. Если объекты не фиксируются по двум осям, то нужно применять схему, представленную на рис. 6.70, б. В случае выбора объекта определенной формы из группы различных изделий, или задачи сортировки объектов на группы при произвольной ориентации, необходимо строить рецепторное поле, содержащее  $N^2$  двухпозиционных датчиков (рис. 6.70, в) [6.12].

На рис. 6.71 приведена функциональная схема робота, оцувствленного вышеописанной СТЗ. Вариант робота, в СТЗ которого использована первая схема расположения линейки фотоприемников, опробован при сортировке и укладке изделий в фарфорофаянсовом производстве, сортировке и контроле пресс-матриц в производстве абразивных изделий, обслуживании кузнечных линий. В этой работе реализован следующий алгоритм:  $a \rightarrow b \rightarrow c$  ( $a$  – взять заготовку в накопителе;  $b$  – ждать;  $c$  – установить заготовку в станок).

Функциональная схема робота, оцувствленного СТЗ, выполненной по второй схеме (рис. 6.70, в), представлена на рис. 6.72. Световой поток светоизлучателей 1 и 2 модулируется сигналами блока синхронизации 9 и поступает на соответствующие фотоприемники 3 и 4, выходные сигналы которых усиливаются и нормализуются резонансным усилителем 5. Блок синхронизации 9 обеспечивает выдачу на каждый светоизлучатель  $K$  импульсов и в момент посылки  $K$ -го импульса подает разрешающий сигнал на схему «И» 8. Через эту схему происходит считывание сигнала с выхода компаратора 7. Блок синхронизации 9 обеспечивает последовательную коммутацию  $m$  линейки светоизлучателей 1 и линейки  $n$  светоизлучателей 2 и управляет работой блока определения параметров положения объекта 10. Этот блок, используя метод теней или проекций, определяет координаты  $X_0$ ,  $Y_0$ , положения геометрического центра объекта по положениям теневых проекций на линейки фотоприемников по формулам

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}, y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2},$$

где  $x_1 + x_2$  – координаты границ тени объекта на ось  $x$ ;  $y_1 + y_2$  – координаты границ тени объекта на ось  $y$ .

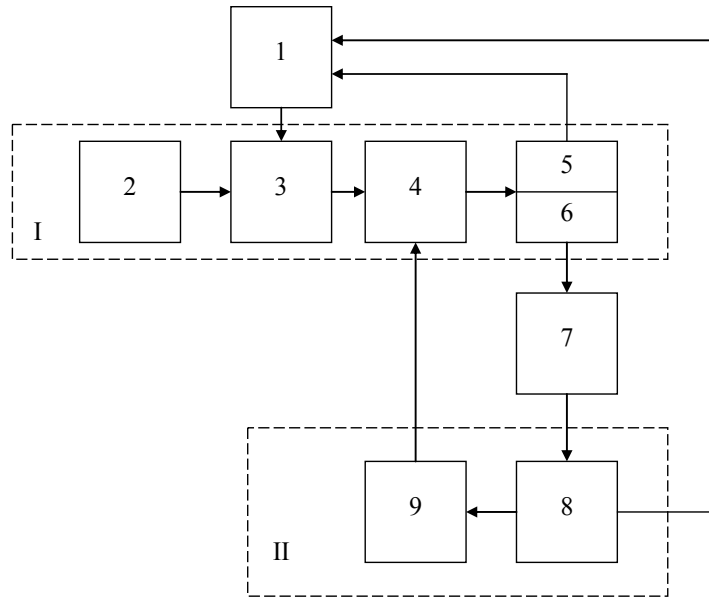


Рис. 6.71. Блок-схема робота, о чувствительного СТЗ  
(на основе чувствительной поверхности):

I – структура нечувствительного робота, II – система технического зрения,  
1 – блок адаптации, 2 – исходная программа, 3 – память, 4 – текущая программа, 5 – датчик, 6 – двигательная система, 7 – внешняя среда,  
8 – датчик состояния среды, 9 – блок обработки информации

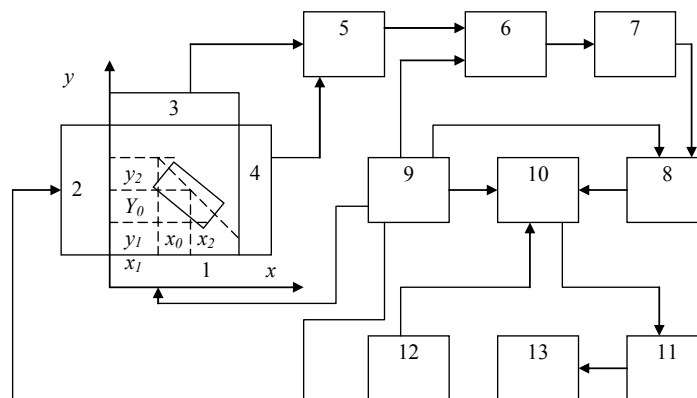


Рис. 6.72. Функциональная схема СТЗ

(на основе чувствительной поверхности) и ее применение:

1, 2 – светозлучатели, 3, 4 – фотоприемники, 5 – усилитель, 6 – интегратор,  
7 – компаратор, 8 – схема «И», 9 – блок синхронизации, 10 – блок определения параметров положения объекта, 11 – блок управления манипулятором,  
12 – датчик контакта с предметом, 13 – манипулятор

Угол  $\varphi$  ориентации большей оси симметрии объекта определяется как

$$\varphi = \pm \arcsin \frac{A(y_2 - y_1) - B(x_2 - x_1)}{A^2 - B^2},$$

где  $A$  и  $B$  – линейные размеры объекта (хранятся в блоке 10).

На вход блока управления манипулятором поступает информация о координатах точки рабочей зоны робота, куда необходимо вывести схват, и значении угла  $\varphi$  поворота схвата. В случае, если объект ориентирован иначе, то один из датчиков 12, размещенный на охвате, выдает сигнал, вызывающий вращение схвата до положения, соответствующего углу  $\varphi$ . После этого происходит взятие объекта.

Экспериментальный образец СТЗ реализован на основе чувствительной поверхности, образованной матрицей  $64 \times 64$  пары светоизлучателя фотоприемника.

#### Технические характеристики

Разрешающая способность, мм	10
Точность определения координат геометрического центра объекта, мм	5
Точность определения угла ориентации большей оси объекта, град	не более 10
Время обработки информации, с	не более 1
Потребляемая мощность, Вт	180

СТЗ обладает высокой помехоустойчивостью к воздействию различных электрических и световых помех.

#### 6.6.15. Универсальные системы технического зрения

Компактный контроллер (рис. 6.73), предназначенный для создания автономных распределенных систем обработки, анализа видеоизображений и управления. Рассчитан на прямое подключение к нему до трех цифровых видеокамер с Fireware (IEEE1394) интерфейсом.



Рис. 6.73. Система технического зрения NI CVS-1454

Характеристики компактной системы технического зрения NI CVS-1454:

- контроллер реального времени;
- ПЛИС;
- подключение до 3-х цифровых камер стандарта IEEE-1394;
- цифровой ввод/вывод сигналов (в том числе токовый) [6.10].

Системы технического зрения National Instruments могут быть тесно интегрированы с другим оборудованием компании, таким, как системы сбора данных, модульные приборы, системы распределенного ввода/вывода, системы управления движением и др. [6.6.]

Компактные системы технического зрения NI CVS-145x обладают гибкостью, возможностями интеграции и надежностью, необходимыми в промышленных приложениях визуальной инспекции, выравнивания, измерений и идентификации. Высокопроизводительный процессор реального времени и встроенная ПЛИС позволяют системам NI CVS-145x выполнять любые задачи видеоинспекции. Наличие цифрового ввода/вывода означает, что системы CVS-145x способны взаимодействовать с широким спектром приборов автоматизации, в том числе с ПЛК, реле и робототехникой. Системы CVS-145x разработаны для работы в экстремальных условиях, свойственных различным процессам производства.

### **Контрольные вопросы к разделу 6**

- 6.1. Перечислите примеры применения информационных систем в мехатронике.
- 6.2. Представьте структурную схему и поясните алгоритм интеллектуальной медицинской оптико-телевизионной диагностической системы.
- 6.3. Поясните состав программного обеспечения систем технического зрения.
- 6.4. Представьте структурную схему и алгоритм работы оптико-телевизионной информационной системы.
- 6.5. Объясните корреляционный и фрактальный алгоритмы диагностики материалов.
- 6.6. Представьте структурную схему информационной системы и алгоритм работы медицинского микроробота.
- 6.7. Поясните принцип действия информационной системы медицинского наноробота.
- 6.8. Приведите примеры медицинских массажных мехатронных систем.
- 6.9. Представьте структурные схемы светолокационных систем; поясните алгоритм работы стереосистем технического зрения.



- 6.10. Поясните принцип действия систем технического зрения для контроля полупроводниковых изделий, печатных плат, фотошаблонов и символов.
- 6.11. В чем отличие систем технического зрения контроля стрелочных приборов от систем технического зрения, используемых в гибких производственных модулях сварки, сборки и механообработки?
- 6.12. Поясните принципы действия систем технического зрения для контроля объектов в рабочей зоне робота и автоматизации хлопкоуборочных процессов.
- 6.13. Представьте алгоритм работы систем технического зрения для контроля распределения температуры на поверхности, контроля параметров оптических деталей и раскрыя материала.
- 6.14. Поясните принцип действия информационных линеек и полей.
- 6.15. Приведите примеры комплектации современных цифровых систем технического зрения.

### Литература к разделу 6

- 6.1. Dauskardt R.H., Haubensak F., Ritchie R.O. On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces // *Acta metallurgica et materialie*. – 1990. – Vol 38. – № 2. – P. 143–159.
- 6.2. Ахо А.В., Хопкрофт Д.Э., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2000. – 384 с.
- 6.3. Бобровский С. Почему мельчают роботы» // <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=70814>
- 6.4. Верещагин В.И., Козик В.В., Сырямкин В.И. и др. Полифункциональные неорганические материалы на основе природных и искусственных соединений. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 359 с.
- 6.5. Корилов А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С. Корреляционные зрительные системы роботов. – Томск: Радио и Связь. Том. отд-ние, 1990. – 264 с.
- 6.6. Новые технологии // Электронный ресурс <http://www.controlengrussia.com/dec06-10.php4?num=>
- 6.7. Носырев И. Врач внутри // <http://www.rbcdaily.ru/2007/03/27/cnews/269699>
- 6.8. Петров А.А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов (алгоритмы технического зрения роботов) // *Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика*. – М.: ВНИИТИ, 1984. – 359 с.
- 6.9. Саврасов Г. В. Медицинская робототехника: Состояние, проблемы и основные принципы проектирования. – М.: Изд-во МГТУ

- им. Н.Э. Баумана «Биомедицинская инженерия и технология», 1998. – С. 35–50.
- 6.10. Система технического зрения NI CVS-1454 // Электронный ресурс <http://www.automationlabs.ru/index.php/hardware/42-hardware/84----ni-cvs-1454>
- 6.11. Системы технического зрения. Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, и др.; Под ред. В.И. Сырямкина и В.С. Титова. – Томск: МГП «РАСКО», 1992. – 367 с.
- 6.12. Сырямкин В.И. и др. Интеллектуальные оптико-телевизионные измерительные системы для технической и медицинской диагностики // Ноосферные знания и технологии: Сборник трудов РАЕН / под ред. проф. Г.В. Майера. – Вып. 2. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – С. 61–72.
- 6.13. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
- 6.14. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. – Н-ск: Наука Сиб. изд. РАН, 1995. – Т. 1. – 298 с.
- 6.15. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М: Мир, 1989. – 624 с.
- 6.16. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
- 6.17. Эргономические аспекты проектирования медицинской мини-робототехнической системы / Г.В. Саврасов и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Издательство «Новые технологии», 2003. – № 8 – С. 47–52
- 6.18. Головин В.Ф. Мехатронная система для манипуляций на мягких тканях // Мехатроника. – № 7. – 2002.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ В МЕХАТРОНИКЕ .....	4
1.1. Введение .....	4
1.2. Общие сведения из теории информации .....	4
1.3. Понятие сигнала. Классы и типы сигнала .....	6
1.4. Общая модель информационной системы .....	12
1.4.1. Системы связи .....	15
1.4.2. Системы хранения информации .....	19
1.4.3. Преобразователи информации .....	20
1.4.4. Другие типы информационных систем .....	22
1.5. Классификация информационных систем, используемых в мехатронике .....	23
Контрольные вопросы к разделу 1 .....	28
Список литературы к разделу 1 .....	28
2. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ .....	29
2.1. Введение .....	29
2.2. Общие сведения о метрологическом обеспечении ИС .....	31
2.3. Метрологические характеристики информационных систем .....	32
2.4. Погрешности ИС .....	35
2.4.1. Общие сведения о погрешностях измерений .....	35
2.4.2. Виды распределений случайных величин .....	36
2.4.2.1. Равномерное распределение .....	36
2.4.2.2. Нормальное распределение .....	37
2.4.2.3. Экспоненциальное распределение .....	39
2.4.3. Классификация погрешностей .....	40
2.4.4. Оценка статистических характеристик погрешностей ИС .....	44
2.5. Основные этапы измерительных технологий .....	50
2.6. Примеры взаимодействия датчиков с объектом измерений .....	52
2.7. Поверка ИС .....	56
2.8. Контроль и диагностика информационных систем .....	61
2.8.1. Отказы и надежность информационных систем .....	61
2.8.2. Особенности контроля и диагностики информационных систем .....	68
2.9. Заключение .....	73

Контрольные вопросы к разделу 2 .....	73
Литература к разделу 2 .....	74
<b>3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МЕХАТРОНИКИ .....</b>	<b>75</b>
3.1. Системы технического зрения роботов	
как разновидность информационных систем мехатроники .....	75
3.1.1. Общие сведения о системах технического зрения (СТЗ) .....	75
3.1.2. Классификация СТЗ .....	76
3.1.3. Обобщенная структурная схема СТЗ .....	80
3.1.4. Требования, предъявляемые СТЗ .....	81
3.1.5. Алгоритмы обработки зрительной информации в СТЗ .....	85
3.1.5.1. Обобщенный алгоритм обработки	
зрительной информации .....	85
3.1.5.2. Формирование изображений .....	87
3.1.5.3. Предварительная обработка изображений .....	91
3.1.5.4. Сегментация изображений .....	97
3.1.5.5. Описание изображений .....	104
3.1.5.6. Анализ изображений .....	111
3.1.6. Алгоритмы анализа цветных	
и объемных изображений в СТЗ .....	113
3.2. Применение структурно-перестраиваемых	
вычислительных сред в процессе обработки информации .....	123
3.3. Интегрированные информационные системы охраны объектов .....	130
3.3.1. Структурно-функциональная схема системы охраны .....	131
3.3.2. Классификация систем охраны .....	132
3.3.3. Датчики систем охраны. ....	134
3.3.4. Системы охранного телевидения. ....	138
3.3.5. Современные интегрированные системы охраны .....	140
3.4. ПО для информационных систем мехатроники .....	150
3.4.1. Введение .....	150
3.4.2. Общие сведения о программном обеспечении	
информационных систем .....	151
3.4.3. Языки программирования интеллектуальных систем .....	158
3.4.3.1. Интерпретаторы .....	159
3.4.3.2. Компиляторы .....	160
3.4.3.3. Классификация языков программирования .....	161
Контрольные вопросы к разделу 3 .....	172
Список литературы к разделу 3 .....	173
<b>4. ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА</b>	
<b>ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>174</b>
4.1. Введение .....	174
4.2. Осветители рабочей зоны .....	174

4.3. Оптико-электронные приемники излучения .....	178
4.4. Видеопроцессоры .....	197
4.5. Датчики оцувствления .....	208
4.5.1. Индуктивные датчики .....	208
4.5.2. Датчики Холла .....	209
4.5.3. Емкостные датчики .....	211
4.5.5. Оптические датчики измерения в ближней зоне .....	214
4.5.6. Тактильные датчики .....	215
4.5.7. Дискретные пороговые датчики .....	215
4.5.8. Аналоговые датчики .....	216
4.5.9. Силомоментное оцувствление .....	221
4.5.10. Элементы датчика схвата, встроенного в запястье .....	221
4.5.11. Выделение сил и моментов .....	222
4.5.12. Внутренние датчики информации о состоянии рабочих органов робота .....	223
4.5.13. Пример применения датчиков информации в роботах .....	226
Контрольные вопросы к разделу 4 .....	228
Список литературы к разделу 4 .....	229
<b>5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИС .....</b>	<b>230</b>
5.1. Введение .....	230
5.2. Структура САПР корреляционно-экстремальных систем .....	231
5.3. Структурный синтез ИС на основе функционально-стоимостного анализа .....	233
5.3.1. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания ИС .....	233
5.3.2. Функционально-стоимостной анализ на ранних этапах научно-исследовательской работы .....	235
5.3.3. Экспресс-ФСА на основных этапах научно-исследовательской работы .....	240
5.3.4. Функционально-стоимостной анализ при оптимизации структуры ИС .....	246
5.3.5. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании ИС .....	254
5.3.5.1. Выбор способа контроля качества изделий на основе метода расстановки приоритетов .....	254
5.3.5.2. Предварительный выбор элементов структуры ИС на основе экспресс-ФСА .....	257
5.3.5.3. Выбор оптимального варианта структуры элементов ИС .....	261

5.4. Параметрический синтез корреляционно-экстремальных систем .....	266
5.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию ИС .....	266
5.4.2. Инженерный (приближенный) расчет ИС .....	269
5.4.2.1. Расчет емкости памяти ИС .....	269
5.4.2.2. Оценка быстродействия ИС .....	274
5.4.2.3. Методика расчета ИС .....	282
5.5. Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для моделирования, проектирования и настройки ИС .....	283
5.5.1. Состав аппаратно-программного комплекса .....	283
5.5.2. Структура программного обеспечения .....	286
Контрольные вопросы к разделу 5 .....	290
Список литературы к разделу 5 .....	291
<b>6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ .....</b>	<b>292</b>
6.1. Введение .....	292
6.2. Информационные системы микро- и минироботов .....	292
6.3. Медицинские информационные системы .....	299
6.3.1. Интеллектуальные медицинские оптико-телевизионные диагностические системы .....	299
6.3.2. Информационные системы медицинских микророботов .....	307
6.3.2.1. Состав миниробота, для диагностики и хирургии сосудов .....	308
6.3.2.2. Деятельность хирурга-оператора миниробота .....	311
6.3.2.3. Эргономические требования к хирургическому миниробота .....	313
6.3.2.4. Информационные системы медицинских нанороботов .....	316
6.4. Мехатронная система для манипуляций на мягких тканях .....	319
6.5. Диагностика материалов оптико-телевизионными информационными методами .....	327
6.5.1. Оптико-телевизионная система для диагностики материалов .....	329
6.5.2. Методы измерения значения фрактальной размерности. Метод нормированного размаха .....	333
6.5.3. Метод серии изображений .....	335
6.5.4. Корреляционные статистические алгоритмы .....	336
6.6. Варианты реализации систем технического зрения .....	339
6.6.1. Светолокационные системы технического зрения .....	339

6.6.2. Системы технического зрения для контроля формы полупроводниковых изделий .....	349
6.6.3. Системы технического зрения для контроля печатных плат и фотошаблонов .....	359
6.6.4. Телевизионные системы технического зрения для контроля и поверки стрелочных индикаторных устройств .....	369
6.6.5. Помехоустойчивые системы технического зрения робототехнического гибкого производственного модуля сварки .....	378
6.6.6. Системы технического зрения для гибких производственных модулей механообработки .....	387
6.6.7. Системы технического зрения для контроля объектов в рабочей зоне робота .....	398
6.6.8. Системы технического зрения для распознавания символов .....	403
6.6.9. Системы технического зрения для автоматизации хлопкоуборочных процессов .....	404
6.6.10. Системы технического зрения для контроля распределения температуры на поверхности (СТЗ КРТ) .....	409
6.6.11. Системы технического зрения для робототехнических комплексов, обслуживающих подвесные и ленточные конвейеры .....	413
6.6.12. Системы технического зрения для контроля параметров оптических деталей .....	419
6.6.13. Системы технического зрения для раскрытия материала .....	425
6.6.14. Системы технического зрения на основе бесконтактных чувствительных линеек или поверхностей .....	428
6.6.15. Универсальные системы технического зрения .....	431
Контрольные вопросы к разделу 6 .....	432
Литература к разделу 6 .....	433

Учебное издание

СЫРЯМКИН Владимир Иванович  
РОЖНЁВ Иван Николаевич

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В МЕХТРОНИКЕ

Учебное пособие

Под редакцией проф. В.И. Сырямкина

**Издано в авторской редакции**

Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*  
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 10.09.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,59. Уч.-изд. л. 23,14.  
Заказ \_\_\_\_-11. Тираж 35 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru