

## ЛЕКЦИЯ 4 Приемники света

Все приемники света можно разделить на две большие группы: биологические (глаз) и фотоэлектрические. В качестве элемента средства измерения в системах ОНК могут использоваться оба этих приемника.

### 4.1. Человеческий глаз

Человеческий глаз – это биологический фотоприемник (орган зрения), преобразующий световые сигналы в информационные сигналы (ионные токи), распространяющиеся по нервным волокнам. Зрение - это сложный процесс, включающий в себя сканирующие, фокусирующие и адаптационные (изменение диаметра зрачка) движения глаз и обработку зрительной информации в мозгу человека.

*Анатомически* человеческий глаз (греч. офтальмос, лат. oculus) состоит из глазного яблока, его защитных частей (глазницы и век) и придатков (слезного и двигательного аппарата). Его составными частями являются (рис. 1.1): 1 - зрительный нерв; 2 - твердая оболочка зрительного нерва, 3 - склера; 4 - конъюнктив склеры; 5 - роговая оболочка; 6 - сосудистая оболочка; 7 - ресничное тело; 8 - радужная оболочка; 9 - сетчатка; 10 - центральная ямка; 11 - зубчатый край, 12 - хрусталик; 13 - стекловидное тело; 14 - передняя камера; 15 - задняя камера; 16 - циннова связка; 17 - петитов канал.

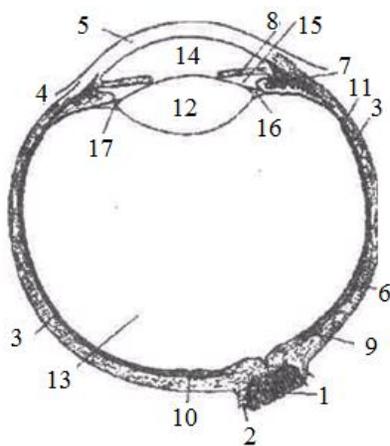


Рис. 4.1

Непосредственным датчиком оптической информации служит *глазное яблоко*. Оно имеет сложное строение и состоит из образований, которые с функциональной точки зрения можно разделить на четыре группы:

- капсула глаза, т.е. наружная оболочка глазного яблока (склера 3, роговица 5);
- сосудистый тракт;
- светочувствительный аппарат (сетчатка 9 и зрительный нерв 1);
- светопреломляющий аппарат (роговица 5, водянистая влага, хрусталик 2, стекловидное тело 13).

В зависимости от того, какая часть сетчатки принимает участие в световосприятии, различают центральное и периферическое зрение.

*Центральное зрение* - это зрение желтого пятна, т.е. наиболее чувствительного места сетчатки (при дневном освещении). Желтое пятно расположено вокруг центральной ямки (на рис. 4.1 обозначено цифрой 10) и имеет размеры: по горизонтали 1÷3 мм, по вертикали - 0,8 мм. Центральное зрение определяет остроту зрения.

Функция сетчатки вне желтого пятна - *периферическое зрение*. Оно служит нам в основном для ориентировки в пространстве, так как при нем человек видит предметы значительно менее четко, различая в них мало деталей. В зоне периферического зрения особенно хорошо видны движущиеся предметы. Ощущение цвета в этой зоне значительно ослаблено.

С оптической точки зрения глаз является центрированной оптической системой, состоящей из двух линз: роговицы и хрусталика, которые разделены передней камерой, заполненной водянистой влагой. Передняя поверхность роговицы граничит с воздухом, а между хрусталиком и сетчаткой расположено стекловидное тело. Роль апертурной диафрагмы в глазу выполняет зрачок.

Оптические параметры глаза у разных людей разные, поэтому при точных расчетах визуально-оптических систем используют их средние значения (глаз с такими параметрами называется схематическим). Однако в большинстве расчетов достаточно использовать еще более упрощенную модель, называемую *редуцированным глазом*. Эта модель получается при следующих предположениях: все преломляющие поверхности глаза можно заменить одной эквивалентной преломляющей поверхностью, которая разделяет воздух и стекловидное тело; так как расстояние между главными точками редуцированного глаза мало, то их можно считать совпадающими. Геометрические и оптические параметры редуцированного глаза указаны на рис. 4.2, где  $F$  и  $F'$  – передний и задний фокусы;  $H$  и  $H'$  – главные плоскости;  $f$  и  $f'$  – переднее и заднее фокусные расстояния;  $n$  – показатель преломления стекловидного тела. Отрицательные знаки фокусного расстояния  $f$  и радиуса кривизны склеры обусловлены правилом знаков в геометрической оптике.

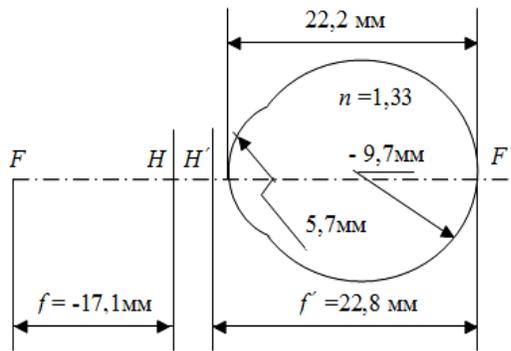


Рис. 4.2

Ниже приведены основные характеристики зрения, знание которых необходимо для конструирования и использования систем ОНК.

*Разрешающая способность зрения  $\varepsilon$*  – это его способность различать мелкие детали изображения.

Она зависит от освещенности, цвета, контрастности отдельных деталей и времени наблюдения объекта контроля (ОК). Разрешающая способность максимальна в белом или желто-зеленом свете при освещенности от  $10 \text{ кд/м}^2$  до  $100 \text{ кд/м}^2$ , высоком контрасте изображения ( $|k| \geq 0,5$ ) и достаточном времени наблюдения (от 5 с до 20 с).

*Угловая разрешающая способность глаза  $\alpha$*  равна минимальному углу между деталями изображения, которые он различает, и для нормального глаза составляет около  $1'$ , когда ОК находится на расстоянии наилучшего видения ( $l = 0,25 \text{ м}$ ), а условия наблюдения соответствуют максимуму  $\varepsilon$ .

*Линейное разрешение глаза  $e$*  в плоскости ОК равно  $e = l\alpha \approx 0,08 \text{ мм}$ .

*Стереоскопическое разрешение глаза*, т.е. способность отдельно различать по глубине детали ОК, составляет примерно  $5 \div 10''$  для оптимальных условий наблюдения, указанных выше.

*Поле зрения* – пространство, которое видит неподвижный глаз. Поле зрения глаза составляет примерно  $125 \times 160^\circ$  ( $180^\circ$  по горизонту для обоих глаз). При этом зона четкого видения (центральное зрение) составляет около  $2^\circ$ .

Глаз способен различать большое количество цветов, что широко используется в колориметрических системах ОНК. Экспериментально оценку цветовосприятия производят с помощью специальных атласов, состоящих из пластинок разного цвета.

Существенным параметром глаза является его *время инерции* (время срабатывания). Оно составляет около  $0,1 \text{ с}$ .

Важнейшая характеристика зрения – *контрастная чувствительность*  $k = \frac{\Delta L}{L_0}$ , где  $\Delta L$  –

минимальная обнаруживаемая разность освещенностей объекта и фона,  $L_0$  – сумма указанных освещенностей. Минимальное значение этой характеристики  $k_{min} = 0,01$  достигается при освещенности от  $10 \text{ кд/м}^2$  до  $100 \text{ кд/м}^2$  в зеленом свете и угловом размере объекта более  $1^\circ$ .

## 4.2. Фотоэлектрические приемники

Фотоэлектрические приемники (ФП) – это устройства, преобразующие световые сигналы в электрические токи. Все они, независимо от конструкции и физических принципов работы, характеризуются рядом параметров.

Чувствительность фотоприемника  $S$  - отношение силы электрического тока  $I$  к падающему на фотоприемник потоку излучения  $\Phi_e$ :

$$S = i / \Phi_e \text{ (А/Вт)}. \quad (1)$$

Спектральная чувствительность фотоприемника (к монохроматическому излучению)  $S_\lambda$  - отношение силы тока  $di_\lambda$ , вызываемого монохроматическим потоком  $d\Phi_\lambda$ , к этому потоку:

$$S_\lambda = di_\lambda / d\Phi_{e,\lambda} \text{ (А/Вт)}. \quad (2)$$

Если на выходе приемника измеряется напряжение, а не сила тока, то чувствительность определяют по напряжению: в формулах (1) и (2) необходимо вместо силы тока брать напряжение ( $U$  или  $dU$ ). Если система работает в видимой области, то в формулах (1) и (2) используется световой поток  $\Phi_v$  (лм).

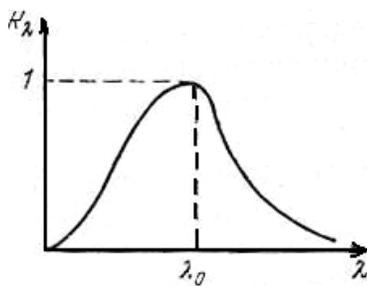


Рис. 4.1

Относительная спектральная чувствительность  $K_\lambda$  определяется по формуле

$$K_\lambda = S_\lambda / S_0, \quad (3)$$

где  $S_0$  – максимальная спектральная чувствительность фотоприемника, соответствующая длине волны  $\lambda_0$ . Типичная зависимость  $K_\lambda$  от длины волны представлена на рис. 4.1.

Из соотношений (2) и (3) следует, что сила тока в цепи фотоприемника при длине волны излучения  $\lambda$  может быть записана в виде

$$di_\lambda = S_\lambda d\Phi_\lambda = K_\lambda S_0 d\Phi_\lambda, \quad (4)$$

а полная сила тока для диапазона длин волн от 0 до  $\infty$  равна  $i = \int_0^\infty di_\lambda$ .

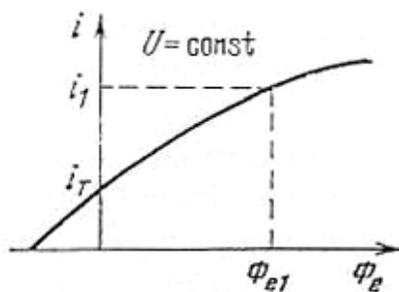


Рис. 4.2

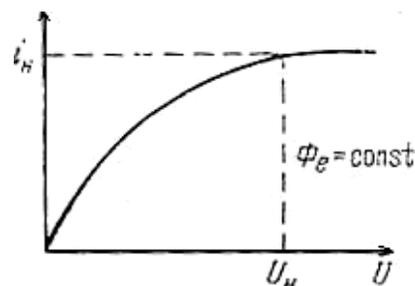


Рис. 4.3

Чувствительность фотоприемника может быть различной для потоков излучения одного и того же состава, но разной мощности.

Зависимость силы тока от потока излучения при постоянном напряжении  $U$  называется *световой характеристикой фотоприемника* (рис. 4.2). По световой характеристике можно определить чувствительность фотоприемника для различных потоков излучения.

Как видно из рис. 4.2 при  $\Phi_e = 0, i \neq 0$ , т.е. за счет внутренних шумов фотоприемника в цепи имеет место ток, который называется *темновым током*.

Если принять  $\Phi_e = const$  и изменять напряжение в цепи фотоприемника, то ток изменяется

по кривой, представленной на рис. 4.3 и называемой *вольт-амперной характеристикой* фотоприемника. При достижении некоторого значения напряжения  $U_n$  ток в цепи становится постоянным  $i_n = \text{const}$  и называется током насыщения.

*Порог чувствительности*  $Q$  есть минимальный поток излучения, при котором возникающий электрический ток в  $e$  раз превышает темновой ток (шумы) фотоприемника.

*Частотная характеристика* фотоприемника определяет его инерционность и характеризуется постоянной времени  $\tau$  – временем, в течение которого выходная величина (сила тока или напряжение) достигает 63% ее установившегося значения, т.е. становится равной  $(1 - 1/e)i$  или  $(1 - 1/e)U$ . Частотная характеристика показывает зависимость чувствительности фотоприемника от частоты модуляции поступающего излучения.

По принципу действия фотоэлектрические приемники подразделяются на тепловые приемники излучения, фотоэмиссионные и фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения.

*Тепловые приемники излучения и радиационные калориметры.* Действие теплового приемника излучения, который является неселективным, основывается на том, что под действием излучения происходит изменение температурно-чувствительного параметра (термо-э.д.с., электрического сопротивления и др.), которое регистрируется измерительной схемой. Различают болометры (металлические, полупроводниковые, диэлектрические, сегнетоэлектрические), радиационные термоэлементы, а также оптоакустические и пироэлектрические тепловые приемники излучения.

*Фотоэмиссионные приемники излучения.* В этих приборах поток излучения падает на светочувствительный фотокатод, находящийся в вакууме или в разреженном газе. Под действием света из катода вырываются электроны (внешний фотоэффект) и движутся в направлении анода: в цепи фотоэлемента изменяется ток. Фотоэмиссионные приемники разделяют на фотоэлементы (ФЭ), фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и передающие телевизионные трубки.

*Фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения.* В этих приборах под действием потока излучения в зоне проводимости полупроводников увеличивается количество носителей тока; при этом сопротивление полупроводника уменьшается и прибор в цепи регистрирует изменение силы тока (внутренний фотоэффект). Различают *фоторезисторы*, в которых поглощение фотонов в полупроводнике может происходить при межзонных переходах (эти приборы имеют линейную световую характеристику и повышенную инерционность), и фотодиоды (или фототранзисторы), в которых под воздействием лучистой энергии возникают электронно-дырочные пары, разделяемые  $p-n$ -переходом и образующие фототок.

Конструктивные решения для оптических систем фотоэлектрических устройств весьма разнообразны.

### 4.3. Модуляторы и анализаторы фотоприемных устройств

В оптическом диапазоне, как и в радиодиапазоне, кроме схем с прямым детектированием оптического сигнала применяют *супергетеродинный (СГД) прием*. В этом случае существенно улучшается такая информационная характеристика оптической информационной системы (ОИС) как отношение сигнал–шум  $B$ :

$$B = \frac{\Delta\omega \cdot P_c}{P_{ш}}, \quad (5)$$

где  $\Delta\omega$  – полоса частот приема,  $P_c$  – мощность сигнала,  $P_{ш}$  – мощность шума. Шум, т.е. случайные сигналы, возникают как в результате работы ФП (дробовый шум), так и вследствие

воздействия внешних источников (фоновый шум), кроме того появляется возможность применять более стабильные и удобные в управлении усилители переменного тока.

При СГД приеме в схему ОИС вводятся *модуляторы*. Существует несколько способов модуляции ОИ:

- а) Непосредственно в источнике света. Это достигается либо применением импульсного теплового (газоразрядного, люминесцентного) источника излучения, либо путем модуляции интенсивности накачки в лазерных источниках света.
- б) На пути между ОК и ФП. В этом случае в оптическую систему вводится ряд различных устройств. Применяются механические, оптико-механические, электрические (ячейки Керра, затвор Фарадея) модуляторы, в которых используются интерференция, дифракция, двойное лучепреломление, полное внутреннее отражение, пьезоэффект и т.п. Не останавливаясь подробно на действии подобных модуляторов, заметим, что эти системы представляют собой оптические затворы, действие которых в большинстве случаев не селективно. Эти устройства обладают коэффициентом полезного действия  $\eta$ , который необходимо учитывать при энергетическом расчете ОИС.
- в) Непосредственно в ФП (собственно гетеродирование). Этого можно достичь путем введения в ОИС дополнительного источника света (гетеродина), который когерентен с основным источником. В этом случае мощность на поверхности ФП  $P$  при сложении монохроматического оптического сигнала и сигнала от гетеродина равна

$$P_0 = P_c + P_2 + 2\sqrt{P_c P_2} \cos(\omega_2 - \omega_c)t, \quad (6)$$

где  $P_c$  – мощность сигнала;  $P_2$  – мощность гетеродина;  $\omega_c$  и  $\omega_2$  – частоты сигнала и гетеродина. СГД приемник лучше, чем приемник прямого детектирования; его селективные качества значительно выше (коэффициент  $B$  может возрасти в три раза).

- г) На выходе цепи приемника. Такая модуляция осуществляется с помощью соответствующих электронных устройств и изменений в схему ОИС не вносит.

В ряде случаев в схему ОИС вводятся *анализаторы*. Это устройства, которые служат для получения информации о наличии в поле ФП исследуемого ОК и его пространственном положении. Существует много типов анализаторов. Все они, как и модуляторы, ограничивают прохождение лучистой энергии в систему фотоприемника, и поэтому их коэффициент полезного действия  $\eta$  необходимо учитывать при расчетах.

В системах автоматического контроля, управления или слежения может быть осуществлена обратная связь между выходным устройством и системой анализатора, который связан с рабочими элементами механизма, осуществляющими управление.