

# 1. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПРИБОРЫ СИСТЕМ ПРИЦЕЛИВАНИЯ

Оптические элементы и оптико-механические приборы являются одними из составных частей современных устройств систем прицеливания. Оптические элементы используются в приборах задания базового направления для прицеливания, в системах передачи направления с одного уровня на другой, для фиксирования различных плоскостей объектов и решения ряда других ответственных задач прицеливания. Из оптических элементов наибольшее применение в системах прицеливания находят плоские зеркала, призмы различных типов, одиночные линзы, комбинации линз - объективы, окуляры и элементы на основе плоскопараллельных пластинок и клиньев.

Оптико-механические приборы и устройства служат для измерения вертикальных и горизонтальных углов, для проверки точности работы автоматических систем прицеливания, контроля вертикальности ракет и транспортных контейнеров, проверки взаимной выставки элементов автоматических систем прицеливания. Для решения этих задач в системах прицеливания используются зрительные трубы, теодолиты, уровни, оптические квадранты и другие устройства.

## 1.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

Действие применяемых в системах прицеливания оптических элементов и оптико-механических устройств основано на использовании различных свойств света. Распространение света представляет собой сложный электромагнитный волновой процесс. Однако в вопросах формирования светового пучка и в вопросах об образовании изображения решение можно получить гораздо более простым путем, с помощью представлений геометрической оптики. Геометрическая оптика оперирует понятием отдельных световых лучей. Световой луч есть геометрическая линия, проведенная перпендикулярно фронту распространения световой волны и показывавшая направление распространения волнового процесса. Таким образом, световой луч – это абстрактное математическое понятие, а не физический образ.

Геометрическая оптика базируется на четырех основных законах: прямолинейного распространения света, независимости световых пучков, отражения света от зеркальной поверхности и преломления света на границе двух прозрачных сред.

Закон прямолинейного распространения света гласит, что в однородной среде свет распространяется по прямым линиям. Действие этого закона позволяет проводить геометрические построения хода лучей в оптических элементах и оптико-механических системах.

Закон независимости световых пучков. Световой поток можно разбить на отдельные световые пучки, выделяя их с помощью узких отверстий (диафрагм). Действие этих выделенных световых пучков оказывается независимым.

Закон отражения гласит: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр отражающей поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости; угол падения  $i$  равен углу отражения  $i'$  (рис. 1, а).

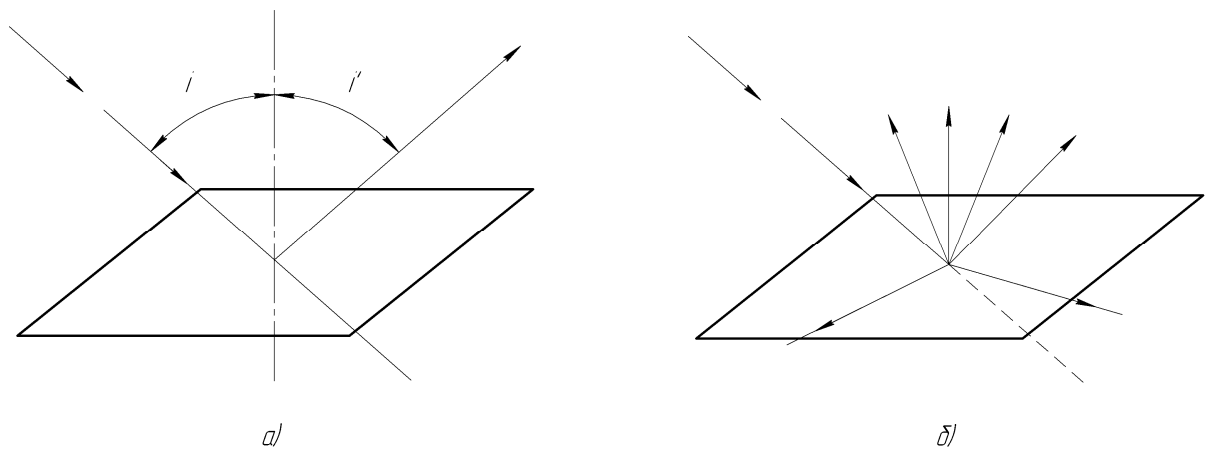


Рис. 1. Отражение светового луча от гладкой поверхности:  
а) зеркальное отражение светового луча;  
б) диффузное отражение светового луча.

Различают диффузное и зеркальное отражение. Для случая отражения от гладких поверхностей имеет место зеркальное отражение. В этом случае отраженные лучи идут в одном направлении (рис.1, а) Если поверхность шероховатая, то отраженные лучи идут во всевозможных направлениях (рис. 1, б). Такое отражение называют диффузным. Вследствие проникновения части световой энергии внутрь среды отражающей поверхности происходит потеря световой энергии.

Под преломлением понимают изменение направления светового луча при переходе из одной среды в другую. Так, при переходе из среды оптически менее плотной в оптически более плотную среду луч после преломления приближается к нормали к поверхности раздела, проведенной в точке падения (рис. 2, а). И, наоборот, удаляется от этой нормали при переходе из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную (рис. 2, б).

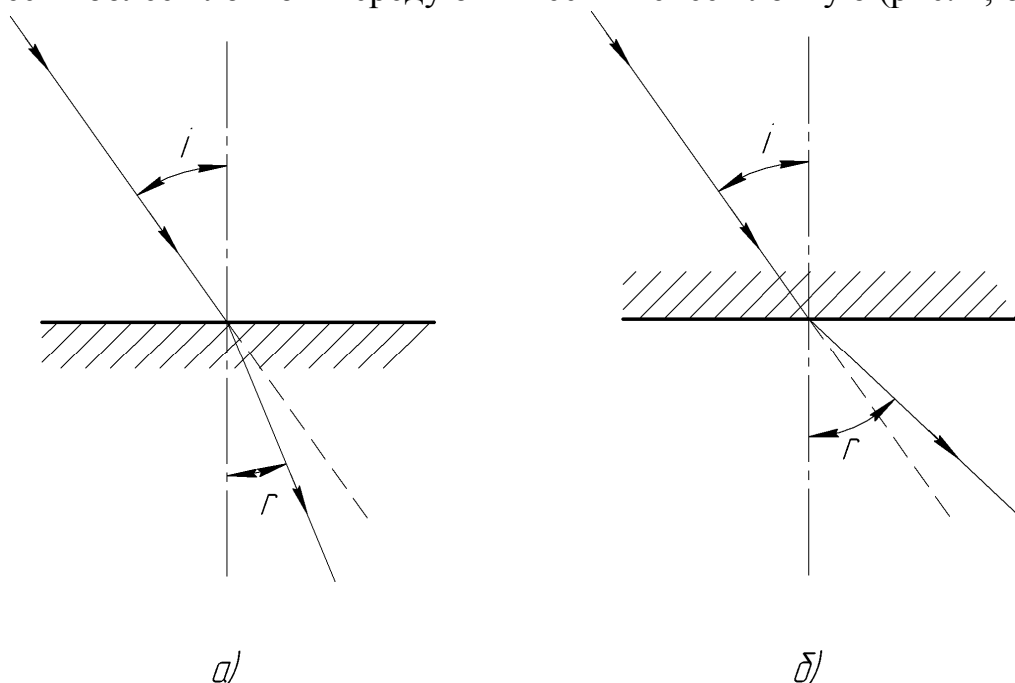


Рис.2. Преломление светового луча:

- а) при переходе светового луча из среды оптически менее плотной в оптически более плотную;
- б) при переходе светового луча из среды более оптически плотной в оптически менее плотную.

Отношение скорости света  $C$  в воздухе к скорости света  $V$  в другой среде называется показателем преломления  $n$  данного вещества по отношению к воздуху. Этот показатель равен частному от деления синуса угла падения  $i$  на синус угла преломления  $r$  и является постоянным для данных сред:

$$n = \frac{C}{V} = \frac{\sin i}{\sin r} = \text{const} \quad (1.1)$$

Показатель преломления по отношению к пустоте называется абсолютным показателем преломления данного вещества. Оптическое стекло имеет абсолютный показатель преломления в пределах  $n = 1,47 \div 1,92$ . Обычно при расчетах оптических приборов принимают абсолютный показатель преломления оптического стекла равным  $n = 1,5$ .

При переходе световых лучей из оптически более плотной среды в оптически менее плотную часть световой энергии переходит в среду оптически менее плотную (например, воздух), а остальная часть отражается (рис. 3). При некотором определенном угле падения  $i_2$  луч не выйдет из оптического элемента, а будет скользить по поверхности раздела. Это явление называется полным внутренним отражением, а угол  $r_2$  — углом полного внутреннего отражения. Если угол падения больше  $i_2$  ( $i_3 > i_2$ ) свет вообще не выйдет на поверхность.

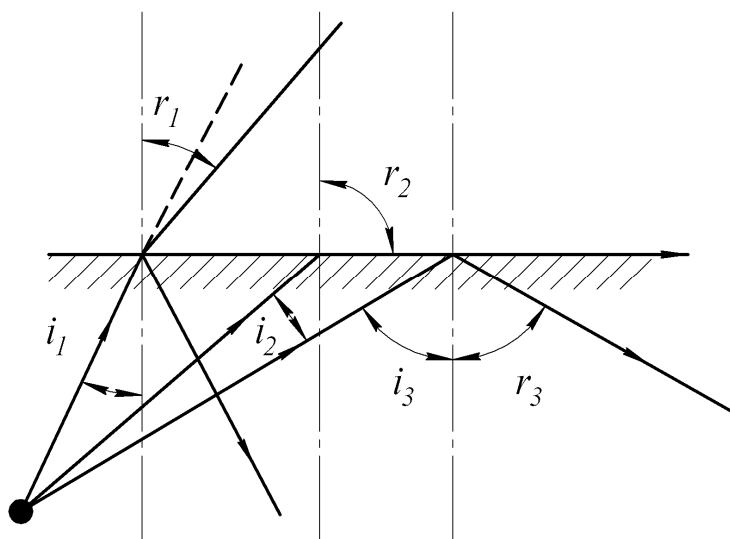


Рис. 3. Преломление световых лучей и явление полного внутреннего отражения.

Следует иметь в виду, что законы геометрической оптики справедливы только в том случае, если поверхность раздела по своим размерам значительно превосходит длину волны света.

В геометрической оптике принято рассматривать каждую светящуюся точку источника как вершину расходящегося пучка лучей. Если после

отражения и преломления этот пучок сходится также в одну точку, то такое изображение называется точечным.

## 1.2. ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Из большого числа различных оптических элементов в системах прицеливания наибольшее применение находят линзы, зеркала, призмы, плоскопараллельные пластинки, а также отдельные узлы, выполняемые в виде склеек или сборок из этих деталей.

### 1.2.1. ЛИНЗЫ

Линза представляет собой прозрачное тело, ограниченное одной или двух сторон сферической поверхностью. Различают линзы собирательные (рис. 4, а) и рассеивающие (рис. 4, б). Выпуклые или вогнутые линзы можно рассматривать как комбинации большого количества весьма узких призм, при чем в выпуклых линзах эти призмы обращены верхушками к краям стекла, а в вогнутых – вершинами к середине. Поэтому лучи света, проходящие через выпуклые стекла, собираются, а вогнутыми стеклами рассеиваются. В каждой линзе имеется точка – оптический центр, - проходя через которую луч не преломляется. Линия соединяющая два центра шаровых поверхностей, которыми ограничена линза, называется главной оптической осью.

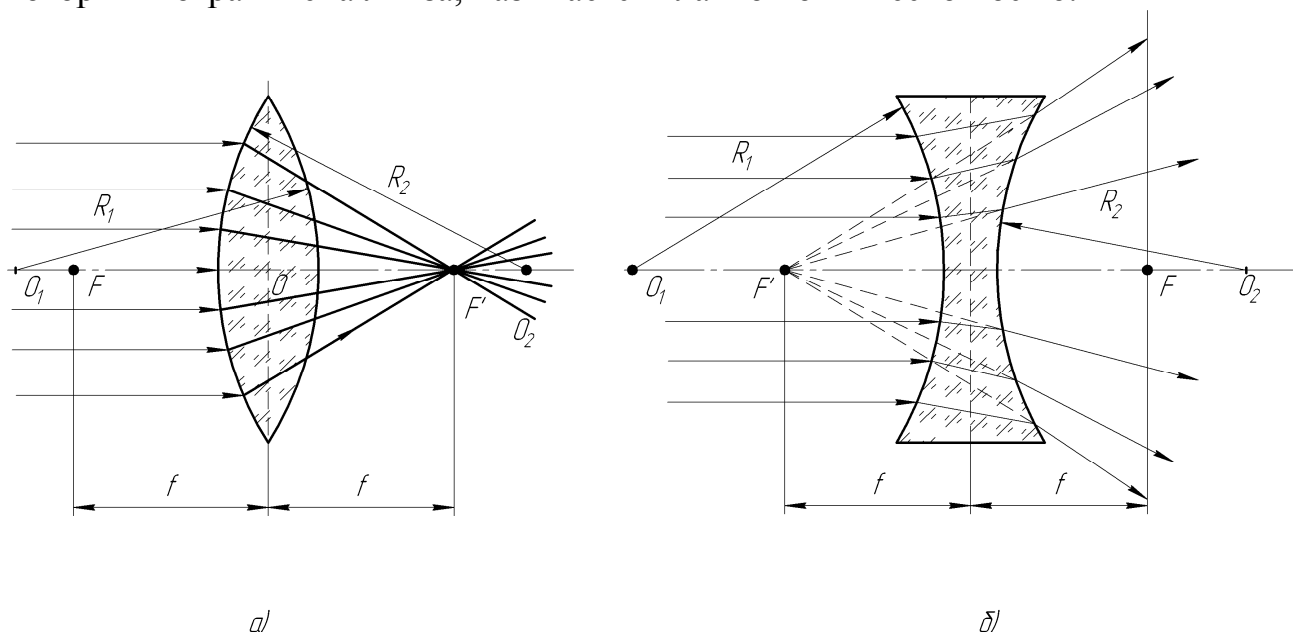


Рис. 4. Линзы:

а) собирательные линзы; б) рассеивающие линзы

Линия  $O_1O_2$ , соединяющая, центры кривизны обеих ограничивающих линзу сферических поверхностей, называется оптической осью линзы, а радиусы этих поверхностей  $R_1$  и  $R_2$  - радиусами кривизны линзы. Параллельные пучки после прохождения собирательной линзы сходятся, а после прохождения рассеивающей – расходятся. Точки пересечения параллельных лучей, проходящих через собирательную линзу, и обратных продолжений лучей, выходящих из рассеивающей линзы, называются главным фокусом. У каждой

линзы два фокуса: передний и задний. Расстояния от плоскости линзы до ее фокусов называются соответственно "передним" (отрезок  $OF = -f$ ) и "задним" (отрезок  $OF' = f$ ) фокусными расстояниями, а величина, обратная фокусным расстояниям - оптической силой  $\Phi$ . Величина и знак оптической силы определяются характером и сходимостью преломленного оптической системой пучка лучей. У собирательных линз  $\Phi > 0$ , у рассеивающих -  $\Phi < 0$ ,

Плоскости, перпендикулярные оптической оси линзы и проходящие через ее фокусы, называются фокальными плоскостями линзы.

Зачастую пучки света, идущие через линзу, не являются узкими. Такие широкие пучки собираются не в одной точке, а образуют круг рассеивания. Возникают различные искажения, называемые aberrациями. Примером таких aberrаций являются сферическая и хроматическая aberrации. Сферическая aberrация происходит из-за того, что внешние и центральные лучи пересекаются не в одной точке оптической оси. Вследствие этого каждая точка предмета изображается не в виде точки, а в виде кружка. Сферическая aberrация устраняется путем использования различных комбинаций собирательных и рассеивающих линз.

Хроматическая aberrация возникает из-за дисперсии света. Световые лучи, проходящие через линзу, имеют различные длины волн и, следовательно, преломляются неодинаково. Из-за хроматической aberrации изображения предметов оказываются окаймленными радужной полоской. Для устранения хроматической aberrации используют комбинацию из двух линз, изготовленных из различных материалов.

Для того чтобы уменьшить влияние различного рода искажений изображения, прохождение крайних лучей ограничивают с помощью специальной пластинки с отверстием. Такая пластинка называется диафрагмой.

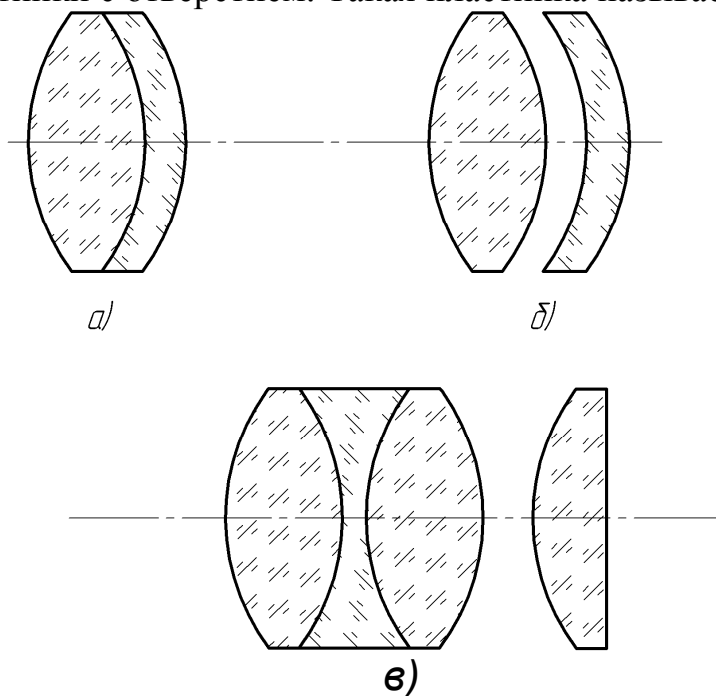


Рис. 5. Объектив и окуляр:

а) обычный ахроматический объектив; б) двухлинзовый объектив с малым воздушным зазором; в) окуляр.

Система линз, расположенная в общей схеме прибора ближе к объекту наблюдения, называется объективом (рис. 5). Объективы приборов систем

прицеливания предназначаются для получения действительного и уменьшенного изображения предмета или для создания параллельного светового пучка лучей, несущего изображение светящегося предмета, расположенного в его фокальной плоскости. Простейший объектив состоит из двух склеенных вместе линз – собирающей и рассеивающей, подбираемых таким образом, чтобы исправить aberrации.

Рассмотрение изображения, построенного объективом, осуществляется окуляром. Оптическая система окуляра состоит из нескольких линз. На рис. 5, в приведена схема четырехлинзового окуляра теодолита типа «ТБ». Такая система существенно снижает хроматические aberrации.

### 1.2.2. ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

В системах прицеливания плоские зеркала используются для фиксации и передачи различных направлений. Зеркалом называется тело, одна или несколько поверхностей которого способны отражать световые лучи. В соответствии с законом отражения, угол отражения светового луча равен углу падения.

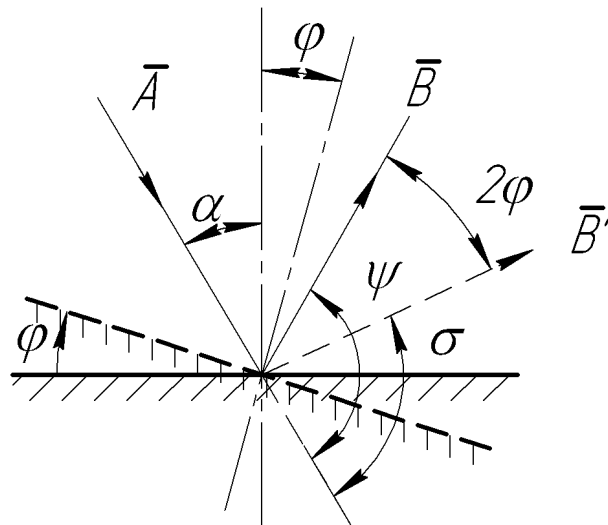


Рис. 6. Отражение светового луча от плоского зеркала

При повороте зеркала на угол  $\varphi$  (рис. 6) отраженный луч поворачивается на угол, равный  $2\varphi$ . Покажем это. Если световой луч  $\bar{A}$  падает на плоское зеркало под углом  $\alpha$  к нормали, то его отклонение  $\bar{B}$  от первоначального направления составит:

$$\psi = 180^\circ - 2\alpha \quad (1.2)$$

При повороте зеркала на угол  $\varphi$  отраженный световой луч  $\bar{B}'$  отклонится от своего первоначального положения на угол:

$$\sigma = 180^\circ - 2(\alpha + \varphi), \quad (1.3)$$

таким образом, поворот отраженного луча составит:

$$\psi - \sigma = 180^\circ - 2\alpha - [180^\circ - 2(\alpha + \varphi)] = 2\varphi \quad (1.4)$$

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из двух зеркал, плоскости которых параллельны друг другу (рис. 7, а). При отражении в такой оптической системе световой луч своего направления не меняет, а лишь смещается на некоторую величину  $\ell$  параллельно самому себе. При повороте такой системы

на некоторый угол  $\varphi$  происходит лишь смещение отраженного луча на величину  $\Delta l$ , а его направление остается неизменным. Если же в такой оптической системе происходит рассогласование зеркал на угол  $\Delta\varphi$ , отраженный луч повернется на угол  $2\Delta\varphi$  (рис. 7, б).

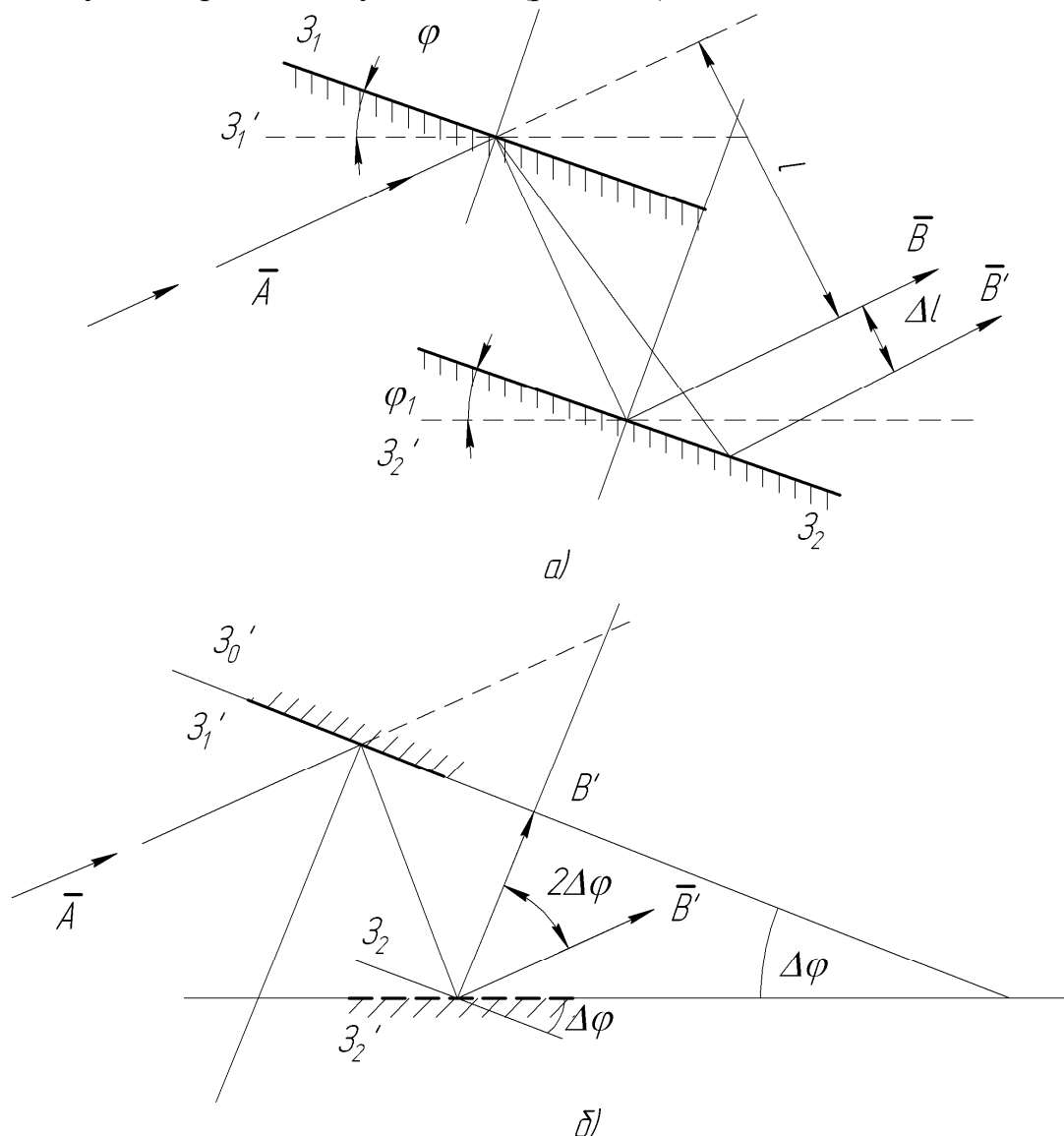


Рис. 7. Ход светового луча в системе, состоящей из двух зеркал:

- а) смещение отраженного луча при повороте двух параллельных зеркал на одинаковый угол; б) изменение хода светового луча, отраженного от двух зеркал при повороте одного из них

Зеркала изготавливаются путем напыления или нанесения другим методом на стеклянную плоско параллельную пластинку тонкого слоя металла (алюминий, хром, родий, золото, серебро). Металл наносится на внешнюю по отношению к падающему световому потоку или внутреннюю сторону. При нанесении на внешнюю сторону зеркальная поверхность оказывается не защищена от внешних воздействий, поэтому она покрывается защитным покрытием или наклеивается еще одна пластина. При нанесении на внутреннюю сторону возрастают потери света за счет его рассеивания при преломлении внутри пластины.

При использовании плоских зеркал для фиксации направлений требуется очень высокая точность выставки плоскости зеркала относительно светового

потока. Поэтому как элемент фиксации направления плоское зеркало в системах прицеливания используется редко, а используется в основном для изменения направления хода лучей.

### 1.2.3. ПРИЗМЫ

В приборах систем прицеливания наибольшее распространение получили прямоугольные равнобедренные призмы, параллелограммные призмы, пентапризмы, многогранные призмы, светоделительные и смесительные призмы, преломляющие призмы (клинья).

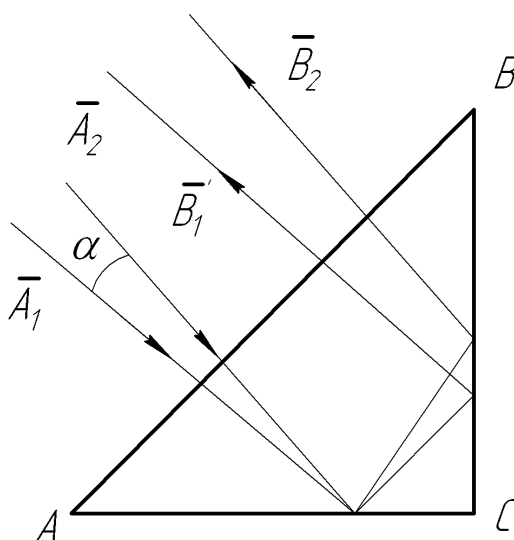


Рис. 8. Прямоугольная равнобедренная призма и ход лучей в ней (призма BP-180°)

Прямоугольная равнобедренная призма, изображенная на рис. 8, широко используется как контрольный элемент, фиксирующий ребром двугранного угла, образованного катетными гранями, азимутальное положение некоторого ориентирного направления. При строгом равенстве угла  $ACB=90^\circ$  луч, падающий на грань  $AB$  отразится призмой в той же плоскости и изменит свое направление на  $180^\circ$ . Лучи, падающие на грань  $AB$  под углом  $\alpha$  (см. рис.8), изменяют свое направление на угол  $2\alpha$ . В этом смысле призма аналогична зеркалу.

Покажем, что поворот призмы вокруг ребра прямого угла не приводит к изменению направления отраженного луча. Введем систему координат  $OXnYnZn$  (рис. 9). Направим ось  $OZn$  по направлению ребра прямого угла, ось  $OYn$  перпендикулярно гипотенузной грани, ось  $OXn$  перпендикулярно первым двум так, чтобы образовалась правая система координат.

Световой луч, падающий на гипотенузную грань призмы, в общем случае подвергается двум видам преобразований: преломляется, дважды отражается от зеркальных поверхностей катетных граней, и вновь преломляется на границе двух сред.

Закон отражения световых лучей в векторной форме может быть представлен выражением:

$$\bar{B} = \bar{A} - 2(\bar{A}, \bar{p})\bar{p}, \quad (1.5)$$



а закон преломления световых лучей – выражением:

$$\bar{B} = \bar{A} - \Gamma \bar{p}, \quad (1.6)$$

где  $\bar{A}$  - вектор падающего луча;

$\bar{B}$  - вектор отраженного луча;

$\bar{p}$  - вектор, характеризующий направление нормали к зеркальной поверхности;

$\Gamma$  - постоянная отклонения светового луча:

$$\Gamma = \sqrt{n_1 - n_2 + (\bar{A} \cdot \bar{p})^2} - \bar{A} \cdot \bar{p}, \quad (1.7)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  показатели преломления оптических сред.

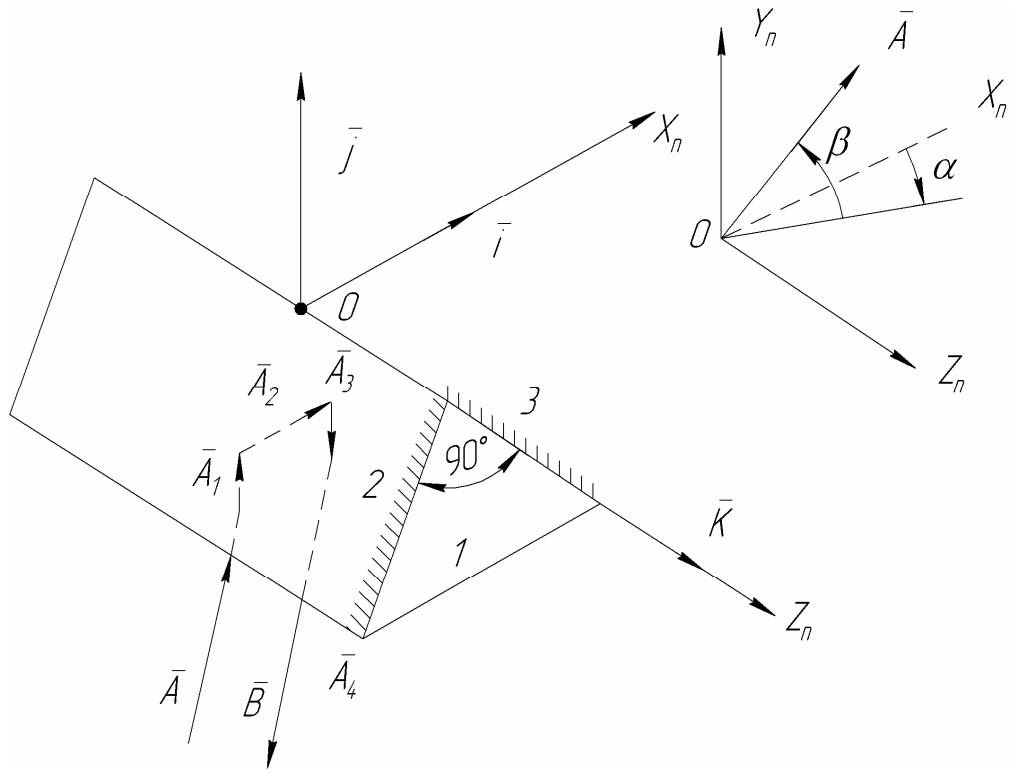


Рис. 9. Свойства прямоугольной призмы

Если световой луч направлен на гипотенузную грань таким образом, что он отклонен от направления оси  $X_n$  на угол  $\alpha$  и приподнят над плоскостью  $X_n O Z_n$  на угол  $\beta$ , то он может быть описан вектором:

$$\bar{A} = \bar{i} \cos \alpha \cos \beta + \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \cos \beta \sin \alpha \quad (1.8)$$

Если призма равнобедренная, то направления нормалей  $\bar{p}$  к граням 1,2,3 (см. рис. 9) определяются соответственно выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{p}_1 &= \bar{j}, \bar{p}_2 = \bar{i} \sin 45^\circ - \bar{j} \cos 45^\circ, \\ \bar{p}_3 &= \bar{i} \cos 45^\circ + \bar{j} \sin 45^\circ. \end{aligned} \quad (1.9)$$

После первого преломления на грани 1 направление светового луча будет:

$$\bar{A}_2 = \bar{A} + \Gamma_1 \bar{p}_1 = \bar{i} \cos \alpha \cos \beta + \bar{j} \sqrt{n_1 - n_2 + \sin^2 \beta} - \bar{k} \cos \beta \sin \alpha \quad (1.10)$$

Отраженный от грани 2 луч определяется выражением:

$$\bar{A}_2 = \bar{A}_1 - 2\bar{p}_2(\bar{A}_1 \bar{p}_2).$$

Подставляя значения векторов  $\bar{A}_1$  и  $\bar{p}_2$ , найдем:

$$\bar{A}_2 = \bar{i}_2 \sqrt{n_1 - n_2 + \sin^2 \beta} + \bar{j} \cos \alpha \cos \beta + \bar{k} \cos \beta \sin \alpha \quad (1.11)$$

После второго отражения луча его направление определяется вектором:

$$\bar{A}_3 = \bar{A}_2 - 2(\bar{A}_2 \bar{p}_3) \bar{p}_3 \quad (1.12)$$

Подставляя в (1.12) значения векторов  $\bar{A}_2$  и  $\bar{p}_3$ , получим выражение:

$$\bar{A}_3 = -\bar{i} \cos \alpha \cos \beta - \bar{j} \sqrt{n_1 - n_2 + \sin^2 \beta} + \bar{k} \cos \beta \cos \alpha \quad (1.13)$$

При выходе из поверхности призмы и переходе в воздушную среду световой луч вновь преломляется. В этом случае направление светового луча определяется выражением:

$$\bar{B} = \bar{A}_4 = \bar{A}_3 + \Gamma_2 \bar{p}_4 \quad (1.14)$$

Подставляем в эту формулу значения  $\bar{A}_3$  и  $\bar{p}_4$  и рассчитанное по формуле (1.7) значение  $\Gamma_2$ , получаем выражение:

$$\bar{B} = \bar{A}_4 = -\bar{i} \cos \alpha \cos \beta - \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \cos \beta \sin \alpha \quad (1.15)$$

Сравнивая выражения (1.8) и (1.15) замечаем, что векторы  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  лежат в параллельных плоскостях. Эти плоскости параллельны также ребру прямого угла призмы.

Таким образом, поворот призмы вокруг ребра прямого угла не приводит к изменению направления отраженного луча.

Для осуществления пространственных изменений хода лучей и для уменьшения габаритов в оптических системах часто применяют не одиночные призмы, а склейки из двух или более призм. На рис. 10, а показана комбинация из двух прямоугольных призм, предназначенная для поворота пучка света в разных плоскостях, а на рис. 10, б приведена комбинация из трех прямоугольных призм (система Порро), обеспечивающая параллельное смещение светового луча.

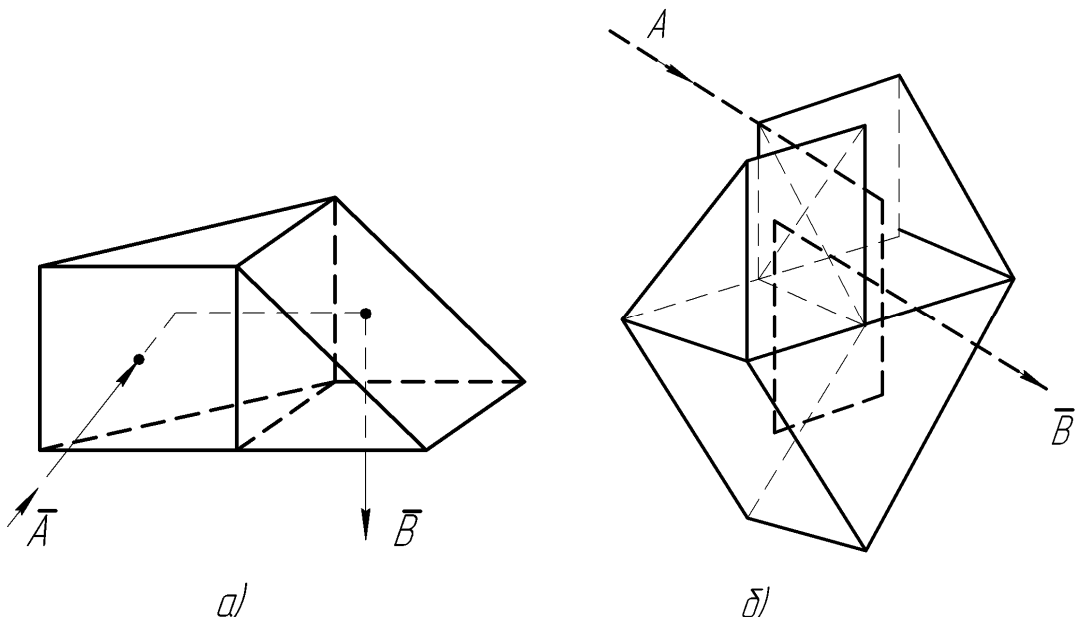


Рис. 10. Системы призм для пространственного изменения хода лучей:  
 а) система призм для поворота лучей света в разных плоскостях; б) система призм для параллельного смещения светового луча

Параллелограммные призмы используются для смещения светового луча по продольной грани призмы. Но направление выходящего луча  $\vec{B}$  остается параллельным входящему лучу  $\vec{A}$  (рис. 11,а). Частным случаем параллелограммной призмы является триппельпризма, приведенная на рис. 11,б. Три ее грани взаимно перпендикулярны, входящий в призму луч  $\vec{A}$  претерпевает полное внутреннее отражение от всех ее граней и выходит в направлении, параллельном первоначальному. При повороте триппельпризмы относительно любой из осей направление отраженного луча остается неизменным. Триппельпризмы применяются в визуальных и автоматических гироскопах.

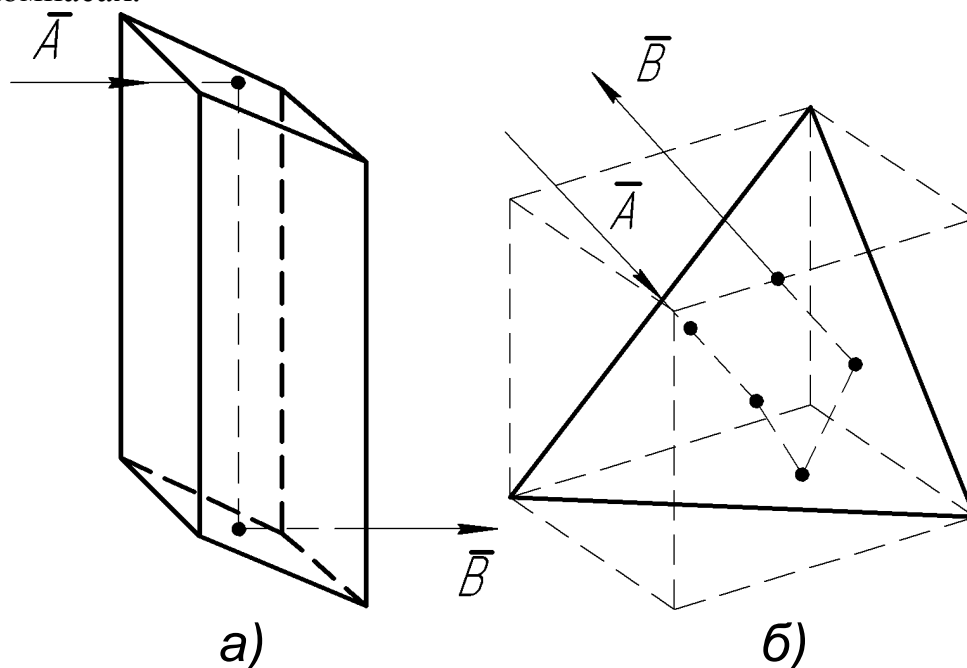


Рис. 11. Параллелограммные призмы:  
 а) ход лучей в параллелограммной призме; б) триппельпризма.

Широкое распространение в приборах систем прицеливания находят пятигранные призмы, называемые обычно пентапризмами. На рис. 12,а приведена схема такой призмы и ход лучей в ней. Две грани  $DE$  и  $FQ$  являются отражающими, а через две грани  $DC$  и  $CQ$  входят и выходят световые лучи. Угол  $\gamma$  между двумя отражающими гранями определяет угол поворота луча  $A$ . Из рис. 12,а, рассматривая треугольники  $OLN$  и  $LMN$ , нетрудно показать, что:

$$\varphi = 2\gamma \quad (1.16)$$

В системах прицеливания пентапризмы чаще всего используются для поворота световых лучей на  $90^\circ$ . У таких пентапризм угол между отраженными гранями равен  $45^\circ$ , а угол между входной и выходной гранями -  $90^\circ$  (рис. 12, б).

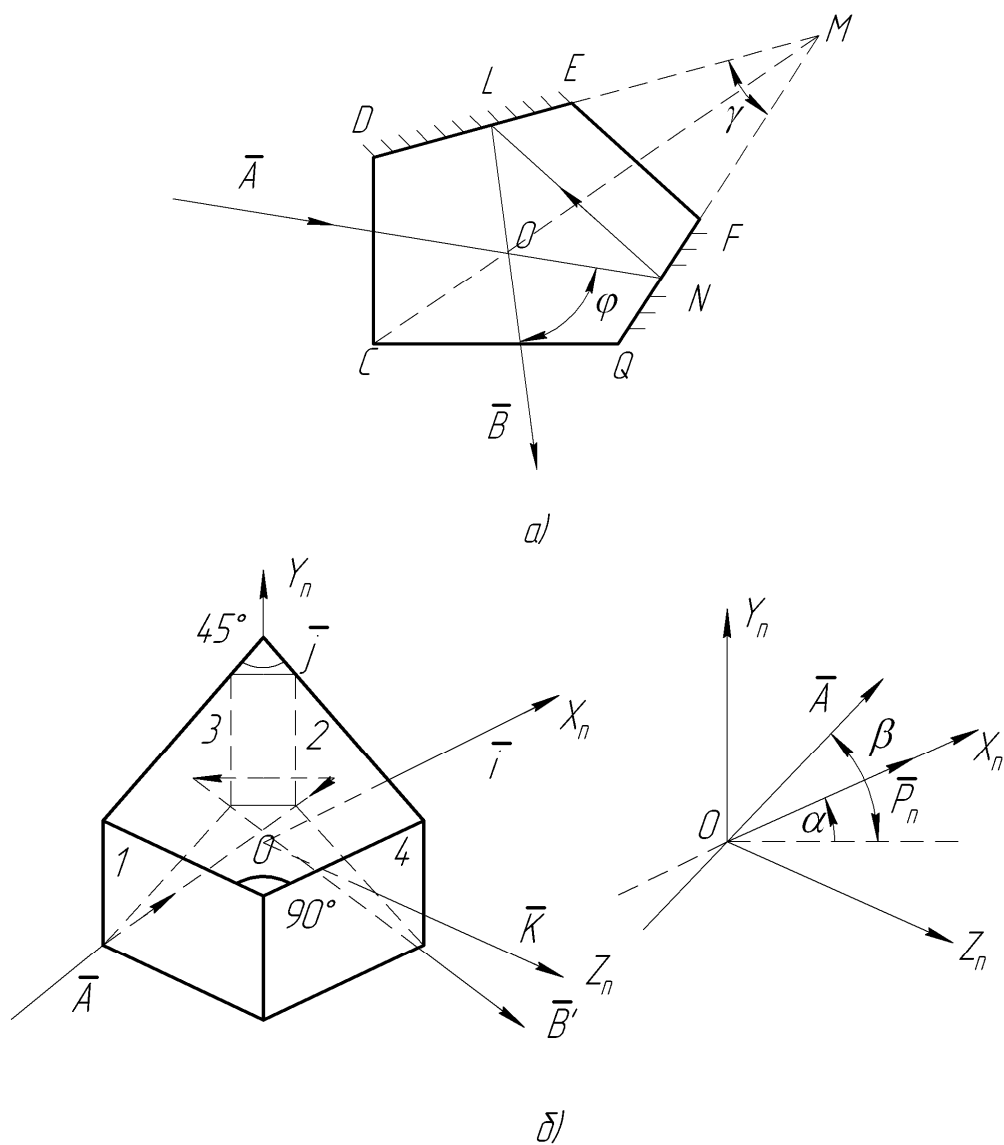
Введем следующую систему координат  $OX_nY_nZ_n$ . Ось  $OX_n$  перпендикулярна входной грани, ось  $OZ_n$  – к отражательной, ось  $OY_n$  дополняет систему до правой. Найдем направление выходного луча  $\bar{B}$ , если вектор входного луча  $\bar{A}$  составляет с нормалью  $\bar{p}_1$  к входной грани углы  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 12, в):

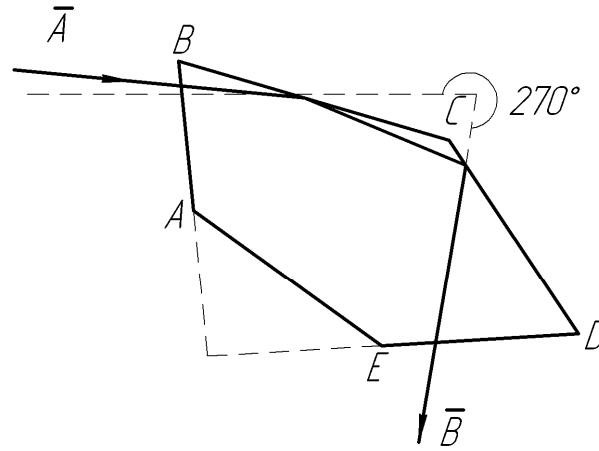
$$\bar{A} = \bar{i} \cos \alpha \cos \beta + \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \sin \alpha \cos \beta \quad (1.17)$$

Направление нормалей  $\bar{p}$  к входной 1, отражательным 2, 3 и выходной 4 граням определяются векторами:

$$\begin{aligned} \bar{p}_1 &= \bar{i}_1, \bar{p}_2 = \bar{i} \cos \gamma/2 + \bar{k} \sin \gamma/2, \\ \bar{p}_3 &= -\bar{i} \sin \gamma/2 - \bar{k} \cos \gamma/2, \bar{p}_4 = \bar{k} \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $\gamma$  - угол между отражательными гранями.





б)

Рис.12 Пентапризмы

а) ход лучей в пентапризме; б) свойства пентапризмы; в) призма Волластона.

По аналогии с тем, как определилось направление выходного луча в прямоугольной призме, можно получить, что:

$$\bar{B} = \bar{A}_4 = -\bar{i} \sin \alpha \cos \beta + \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \cos \alpha \cos \beta \quad (1.19)$$

Найдем угол  $\varphi$  между входным и выходным лучами. В соответствии с правилом скалярного произведения:

$$\cos \varphi = \bar{A} \cdot \bar{A}_4 = \bar{A} \cdot \bar{B}, \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned} \bar{A} \cdot \bar{B} &= (\bar{i} \cos \alpha \cos \beta + \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \sin \alpha \cos \beta) \times \\ &\times (\bar{i} \sin \alpha \cos \beta + \bar{j} \sin \beta + \bar{k} \cos \alpha \cos \beta) = \sin^2 \beta \end{aligned} \quad (1.21)$$

Таким образом:

$$\cos \varphi = \sin^2 \beta \quad (1.22)$$

Имея в виду, что угол  $\varphi = 90^\circ + \Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  - ошибка пентапризмы из-за наклона входного луча на угол  $\beta$ , запишем выражение (1.22) в виде:

$$\cos(90^\circ + \Delta\varphi) = \sin \Delta\varphi = \sin^2 \beta \quad (1.23)$$

Это означает, что ошибка горизонтирования пентапризмы приводит к нарушению перпендикулярности входного и выходного лучей и появлению ошибки отклонения луча в горизонтальной плоскости. Поэтому перед применением пентапризма горизонтируется.

Если угол  $\beta = 0$ , то выражение (1.17) и (1.18) запишутся в следующем виде:

$$\bar{A} = \bar{i} \cos \alpha + \bar{k} \sin \alpha, \quad (1.24)$$

$$\bar{A}_4 = \bar{B} = -\bar{i} \sin \alpha + \bar{k} \cos \alpha$$

Очевидно, что  $\bar{A} \cdot \bar{B} = \cos \varphi = 0$ , т.е.  $\varphi = 90^\circ$ .

Таким образом, поворот пентапризмы на угол  $\varphi$  в горизонтальной плоскости не оказывает влияния на нарушение перпендикулярности входного и выходного лучей.

В поляризационных системах передачи направлений находит применение другая разновидность пятигранных призм - призма Волластона (рис. 12, в). У такой призмы отражающие поверхности  $BC$  и  $CD$  образуют угол, равный  $135^\circ$ . В соответствии с выражением (1.16) угол отклонения луча в этом случае будет равен  $270^\circ$ , а угол поворота составит  $90^\circ$ .

Многогранные призмы применяются в оптических системах, где необходимо задать много фиксированных угловых положений. Примером такой многогранной призмы является 72-гранная призма, устанавливаемая на командном приборе. Угол между нормальными к соседним граням равен:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{n} = \frac{360^\circ}{72} = 5^\circ$$

Одна из граней принимается за "нулевую", к ней юстируются все остальные грани. Погрешности юстировки паспортизируются. Для упрощения технологии при большом числе граней многогранные призмы изготавливаются из нескольких дисков, грани которых сдвинуты на определенный угол. Так, например, 72-гранная призма изготавливается из трех 24-гранных дисков (рис. 13).

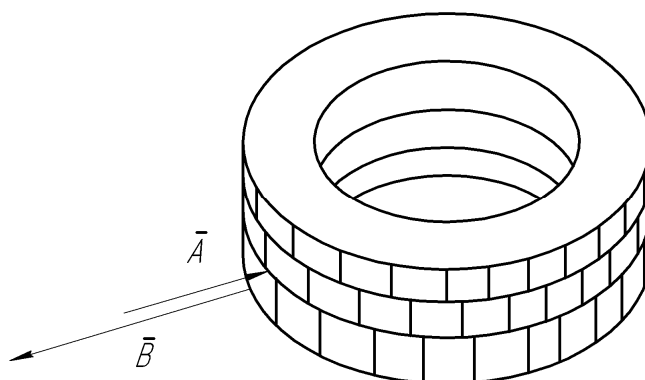


Рис. 13. Многогранная призма

Светоделительные и смесительные призмы используются в автоколлимационных приборах. Светоделительные и смесительные свойства у таких призм возникают вследствие применения полупрозрачного зеркального слоя. На рис. 14 приведен автоколлимационный кубик, представляющий собой склейку из двух прямоугольных призм, гипотенузная грань которых покрыта полупрозрачным слоем. Такая призма позволяет разделить световой поток  $\bar{A}$  на два  $\bar{B}'$  и  $\bar{B}''$  или объединить потоки  $\bar{A}''$  и  $\bar{A}'$  в один поток  $\bar{B}$ . Светоделительные и смесительные призмы применяются в автоколлимационных зрительных трубах, а в сочетании с другими призмами - в узлах подсветки, обеспечивая дублирование ламп подсветки.

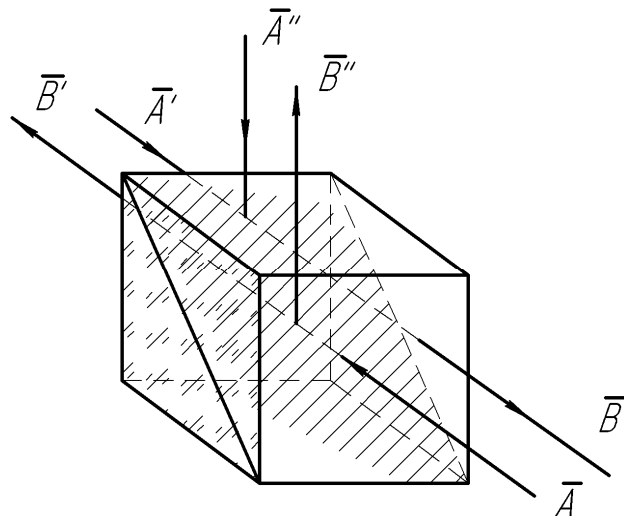


Рис. 14. Светоделительная призма (смесительная).

В автоколлимационных угломерах для создания излучаемого светового потока и анализа отраженного светового потока применяются разделительные призмы (призмы-анализаторы) (рис. 15). Такое устройство представляет собой прямоугольную равнобедренную призму с зеркальными катетными гранями и снятой с ребра прямого угла фаской. Луч света, прошедший через прозрачную фаску, отразившись от какого-то зеркального элемента, может либо вновь попасть на фаску призмы, если плоскость отражающей поверхности перпендикулярна выходящему из призмы лучу света, либо засветить одну из катетных граней, если отражающая поверхность по отношению к падающему на нее лучу света повернута на какой-то угол.

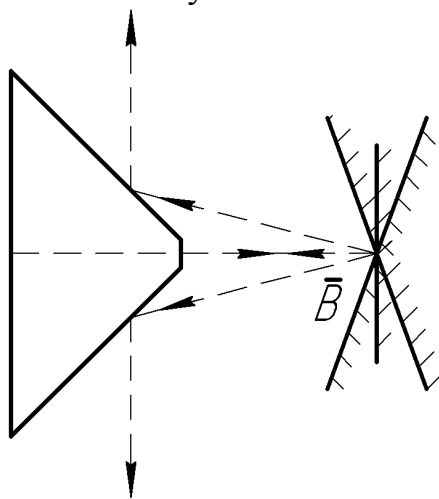


Рис.15. Разделительная призма.

Преломляющие призмы (клинья) используются для смещения световых лучей или их поворотов на малые углы. Клином называется оптическая деталь с двумя преломляющими поверхностями. Угол  $\theta$  между преломляющими поверхностями называется преломляющим углом (рис. 16). Обычно угол не превышает  $6^\circ$ . Свойство клина смещать световые лучи на небольшие углы в сторону основания используется при построении отсчетных механизмов теодолитов и гирокомпасов.

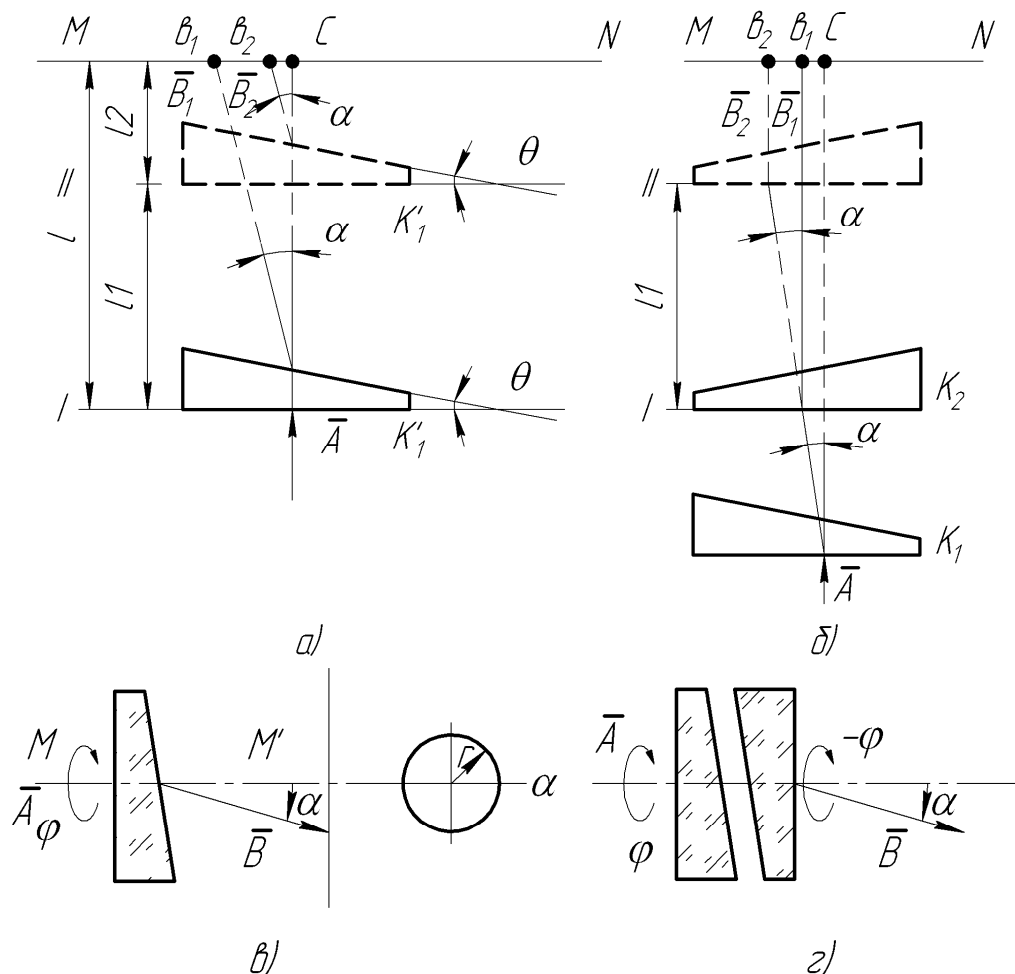


Рис.16 Оптические клинья:

- а) принцип работы измерительной системы с одним клином;  
 б) принцип работы измерительной системы с двумя клиньями;  
 в) поворот светового луча клином; г) поворот светового луча системой из двух клиньев

На рис.16,а в положении I показан оптический клин, входная грань которого параллельна плоскости MN. Выходная грань, клина находится от плоскости MN на расстоянии  $\ell$ . Если луч  $\bar{A}$  падает на входную грань клина, находящегося в положении  $K_1$  под прямым углом, то он отклоняется от первоначального положения на угол  $\alpha$ , величина которого определяется выражением:

$$\alpha = \theta(n-1) \quad (1.25)$$

где  $n$  - показатель преломления.

Преломленный луч  $\bar{B}$  пересечет линию MN в точке  $b_1$ , отстоящей от проекции луча падающего на линию MN на расстояние:

$$cb_1 = \ell \tan \alpha \approx \ell \alpha \quad (1.26)$$

при перемещении клина в направлении AC в положение II луч  $\bar{A}$  преломится и пересечет линию MN в точке  $b_2$ :

$$cb_2 = \ell_2 \tan \alpha \approx \ell_2 \alpha \quad (1.27)$$

Смещение  $b_1 b_2$ , перемещением клина на величину  $b_1 b_2$ , определяется выражением:

$$b_1 b_2 = cb_1 - cb_2 = \alpha(\ell - \ell_2) \quad (1.28)$$



Подставив в формулу (1.28) значения  $\alpha$  из (1.25), имеем:

$$b_1 b_2 = \theta(n-1)\ell_1 \quad (1.29)$$

Величина  $b_1 b_2$  может быть измерена с помощью шкалы, перемещающейся вместе с клином неподвижного индекса. В случае одного клина имеет место хроматическая аберрация. Поэтому применяют систему из двух клиньев  $K_1$  и  $K_2$  (рис. 16, б).

Основания клиньев обращены в разные стороны, а преломляющие углы клиньев выбирают равными. Один из клиньев, например  $K_1$ , закрепляется неподвижно, а другой ( $K_2$ ) перемещается вдоль направления луча  $\bar{A}$ , падающего на первый клин. С подвижным клином связывается отсчетная шкала, по которой измеряется величина перемещения  $\ell_1$ .

Поворот световых лучей может быть получен путем поворота клина вокруг оптической оси  $MM'$  (рис. 16, в) на угол  $\varphi$ . Исходящий из клина луч повернется на угол  $\alpha$ .

При вращении клина относительно оси  $MM'$  преломленный луч описывает окружность радиуса  $r$  на плоскости, перпендикулярной оптической оси  $MM'$ .

Для того чтобы определить отклонение светового луча только в одной плоскости, например в плоскости горизонта, используется оптическая система из двух одинаковых клиньев, вращаемых в противоположных направлениях на угол  $\varphi$  (рис. 16, а).

Угол поворота светового луча, проходящего через систему клиньев в горизонтальной плоскости, определяется выражением:

$$\alpha = 2(n-1)\theta \sin \varphi \quad (1.30)$$

Такие встречно поворачиваемые оптические клинья применяются в оптических компенсаторах изображений автоколлимационных приборов.

## 2. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

### 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Для работы систем прицеливания требуется информация об относительном положении различных элементов и устройств. Восприятие, измерение, преобразование информации осуществляется, как правило, с помощью фотоэлектрических устройств. Важнейшим таким устройством является автоколлимационный прибор (автоколлиматор).

По принципу действия автоколлимационные приборы можно условно разделить на приборы с оптическим отсчетом положения автоколлимационного изображения световой марки относительно сетки зрительной трубы прибора и с фотоэлектрическим преобразователем положения автоколлимационного изображения марки (штриха, индекса) относительно сетки в электрический сигнал.

Приборы первой группы используются для угловых и линейных измерений, исследования лимбов углоизмерительных приборов, в оптических

системах автоколлимационных зрительных труб, теодолитов. Приборы с фотоэлектрическим преобразованием автоколлимационного изображения - фотоэлектрические автоколлиматоры (ФЭАК) применяются в автоматических системах прицеливания.

ФЭАК в системах прицеливания используются либо в достаточно простых и малогабаритных автоколлимационных датчиках (АКД), работающих как на модулированном, так и немодулированном световых потоках, либо в информационно-измерительных системах в качестве сложных автоколлимационных угломеров (АКУ). Они работают на модулированном световом потоке.

В зависимости от того качества светового потока, которое положено в основу выделения сигнала рассогласования ФЭАК можно разделить на амплитудные, фазовые, частотные, временные, а также смешанные типы фотоэлектрических устройств: амплитудно-фазовые, частотно-временные и т.д.

В общем случае фотоэлектрические устройства в своем составе имеют: источники и приемники лучистой энергии, оптические системы, усилители и преобразователи выходных сигналов.

В фотоэлектрических устройствах первоначально информация об измеряемом угловом рассогласовании содержится в световом сигнале, который затем преобразуется в электрический.

В зависимости от назначения и условий работы фотоэлектрических устройств в качестве источника лучистой энергии используются электрические лампы накаливания, полупроводниковые светоизлучающие диоды, оптические квантовые генераторы (полупроводниковые лазеры).

Прием и преобразование лучистой энергии в электрический сигнал осуществляется фотоприемниками. Наибольшее распространение в системах прицеливания получили селективные приемники излучения, такие, как фотоэлектронные умножители, фоторезисторы, фотодиоды, фотометрические приборы с зарядовой связью.

## **2.2. ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

### **2.2.1. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Источники излучения в фотоэлектрических устройствах служат для создания потока лучей, представляющего собой электромагнитные волны, длина которых лежит в диапазоне 0,001 - 1000 мкм. В зависимости от длины волны оптический спектр делится на диапазоны.

Основными параметрами источников излучения являются характер свечения, спектральный состав и мощность излучения, а также потребляемая мощность.

Характер излучения зависит от вида источника света. В качестве источников излучения в системах прицеливания применяются лампы накаливания, светодиоды и лазеры.

В электрических лампах накаливания излучение достигается путем нагрева тела накала проходящим по нему электрическим током. Чем выше

температура раскаленного тела, тем больше излучаемая мощность и относительная доля лучистой энергии на видимую часть спектра.

Для большинства ламп накаливания цветовые температуры составляют 2800 - 3000°K, что дает максимум излучения на волне в 1 мкм, и потому лампы накаливания наиболее эффективны в ближайшей инфракрасной области. Температура лампы накаливания зависит от напряжения питания. Изменение напряжения питания вызывает изменение остальных ее параметров. Так, например, изменение напряжения на 1% от номинального значения влечет за собой изменение светового потока на 3,5%, световой отдачи на 1,8%, срока службы на 13%.

Недостатком лампы накаливания является постепенное распыление тела накала при горении лампы. Со временем это приводит к выходу лампы из строя вследствие перегорания нити канала. Для продления срока службы ламп накаливания колбу лампы наполняют инертным газом (азотом, аргоном, криптоном, ксеноном, парами йода).

В системе прицеливания наибольшее применение находят малогабаритные лампы накаливания типа КГМ-12-100 с галогенным наполнением баллона, напряжением питания 12 В, мощностью около 120 Вт, с максимумом спектра на участке желтого цвета и малогабаритная лампа накаливания СП-13 мощностью 25 Вт и напряжением питания 13 В.

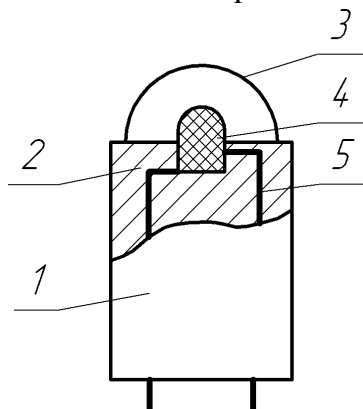


Рис. 26 Светодиод:

1-футляр; 2- полимерный корпус; 3 - сферическая линза; 4-кристалл арсенида галлия; 5- токоподводы.

Полупроводниковые светоизлучающие диоды - специальный класс полупроводниковых приборов, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется в световую. Это источники некогерентного излучения. В основе действия светоизлучающих диодов лежит инжекционная электроиллюминесценция в некоторых полупроводниковых материалах, таких, как арсенид галлия *GaAs*, фосфид *GaP*, карбид кремния *SiC* и др.

Принцип действия светоизлучающих диодов основан на следующем. Когда в полупроводнике создается *p-n* переход, то в области контакта слоев *n*- и *p*- типов электроны с доноров переходят на ближайшие акцепторы. Образуется дипольный слой, состоящий из положительных доноров на *n*-стороне и отрицательных акцепторов на *p*-стороне. Если к *p-n* переходу подвести электрическую энергию, то равновесие дипольного слоя нарушится. В область *p* перейдет добавочное количество электронов, в область *n*-дырок. Такое

движение не основных носителей называется инжекцией. Вследствие инжекции происходит излучение световой энергии.

В настоящее время в оптико-электронных приборах широкое применение находят полупроводниковые диоды, излучающие в инфракрасной области спектра. Большинство излучающих диодов для фотоэлектрических устройств изготавливают из арсенида галлия. Такие светодиоды обладают большим ресурсом работы, высокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, высоким быстродействием, обеспечивают заданную диаграмму направленности излучения и ее минимальное отклонение от геометрической оси прибора.

Характеристики светодиодов зависят от температуры: при повышении температуры уменьшается мощность излучения и сдвигается в сторону больших длин волн максимум интенсивности излучения.

В системах прицеливания используется светодиод с кристаллом из арсенида галлия типа АЛ-107 (рис. 26). Диаметр среды кристалла равен примерно 2 мм. Энергия максимума основной полосы излучения при температуре 18 - 20°C составляет 1,36 эВ на длине волны  $\lambda = 0,95$  мкм. Мощность излучения 10 мВт. Процессы включения и выключения светодиодов определяются постоянными времени  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  с.

В качестве источника излучения может быть использован и полупроводниковый лазер. Лазером называют генератор электромагнитных колебаний оптического диапазона, действие которого основано на усилении света посредством стимулированного излучения. Усилителем служит обычно некоторая активная среда, которая при подаче энергии извне приобретает способность усиливать оптические колебания в некоторой области длин волн  $\lambda$ . Для того чтобы создать незатухающие электромагнитные колебания, используется цепь обратной связи. В простейшем случае это пара зеркал, установленных по обе стороны от активной среды таким образом, чтобы выходящий световой поток возвращался обратно в сферу. Вывод энергии излучения осуществляется через полупрозрачное зеркало.

Лазерное излучение обладает высокой когерентностью, сосредоточено в узком спектральном интервале, является узконаправленным и обладает высокой спектральной плотностью мощности.

В зависимости от физических свойств активной среды различают твердотельные, жидкостные, газовые лазеры. Среди твердотельных лазеров первым практически действующим был рубиновый лазер, активной средой которого является окись алюминия  $Al_2O_3$  с добавлением в качестве активатора положительных ионов хрома. КПД рубинового лазера невелик, обычно не превышает 1% и, кроме того, для исключения перегрева рубинового стержня такие лазеры работают, как правило, в режиме импульсного излучения.

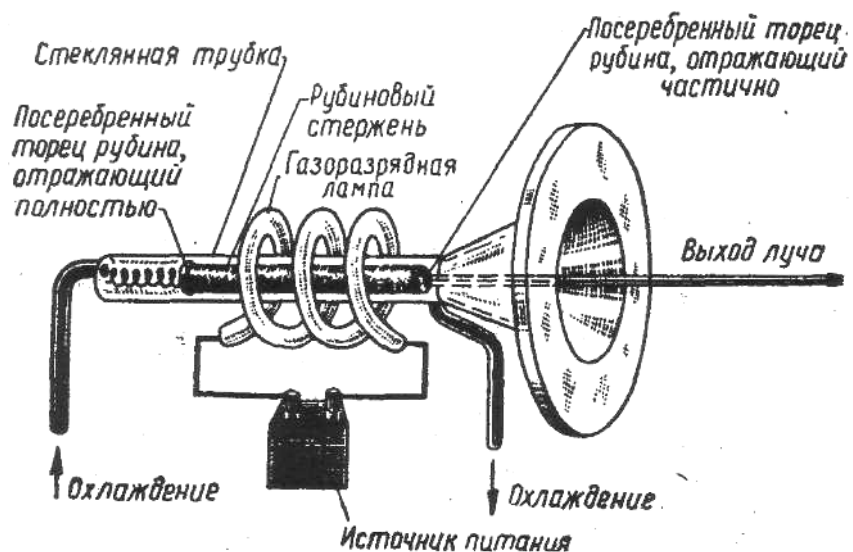


Рис. 26 Схема рубинового лазера

В настоящее время в твердотельных лазерах находит более широкое применение кристалл алюмоиттриевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$  с примесью трехвалентных ионов неодима. КПД такого лазера в 2 - 3 раза выше, чем рубинового, этот лазер может быть использован в режиме постоянной генерации.

Особый класс твердотельных лазеров составляют полупроводниковые лазеры, принцип действия которых основан так же, как и светодиодов, на инжекционной электроиллюминесценции в некоторых полупроводниковых материалах, например арсениде галлия  $GaAs$ . Усиление в инжекционных полупроводниковых лазерах значительно выше, чем у других твердотельных лазеров, поэтому конструкцию резонатора можно упростить, отказавшись от зеркал и используя для создания обратной связи полированные грани полупроводникового кристалла.

Полупроводниковые лазеры имеют высокий КПД, могут излучать как в импульсном, так и в непрерывном режиме, но требуют охлаждения для поддержания стабильности частоты и мощности излучения.

### 2.2.2. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Элементы и устройства, реагирующие на воздействие потока излучения называются приемниками или индикаторами потока излучения.

В зависимости от диапазона длин волн, в котором приемники излучения обладают постоянной чувствительностью, они подразделяются на две группы: интегральные и селективные.

К интегральным относятся тепловые преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании энергии излучения в температуру. Тепловые приемники поглощают всю мощность падающего на них излучения независимо от длины волны излучения. Приемники этой группы в системах прицеливания не нашли применения, поэтому рассмотрим лишь приемники излучения селективного типа.

Принцип действия селективных приемников основан на фотоэлектрическом эффекте, следствием которого является возникновение или изменение фототока. Свойства фотоприемников определяются совокупностью их рабочих характеристик: спектральной и интегральной чувствительностью, вольтамперной характеристикой, постоянной времени, порогом чувствительности и световой характеристикой. Сила фототока, протекающего через фотоэлемент, пропорциональна мощности излучения  $P$ , падающего на фотоэлемент:

$$I_{\phi} = K_{\lambda} P, \quad \text{мкА}, \quad (2.1)$$

где  $K_{\lambda}$  - спектральная чувствительность, А/Вт.

Практически чаще используется относительная спектральная чувствительность  $\gamma_{\lambda}$ :

$$\gamma_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda \max}} \quad (2.2)$$

где  $K_{\lambda \max}$  - максимальное значение чувствительности фотоприемника.

Интегральной чувствительностью фотоприемника называют меру реакции приемника на единицу падающего на него светового потока:

$$S_{\phi} = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi}, \quad \text{мкА/лм}. \quad (2.3)$$

Интегральная чувствительность представляет собой крутизну световой характеристики приемника на ее линейном участке. Рассматривая приемники излучения как звено системы автоматического управления, можно считать интегральную чувствительность коэффициентом усиления приемника.

Интегральная чувствительность фотоприемников зависит от конкретной схемы их включения, физических свойств преобразователей световой энергии в электрическую и от характеристик облучателя.

Величина фототока пропорциональна также напряжению, приложенному к чувствительному элементу, если он работает от внешнего источника питания.

Зависимость фототока от напряжения питания, приложенного к фотоприемнику при постоянном значении светового потока, определяется вольтамперной характеристикой.

Важным параметром фотоприемников является его инерционность. Она характеризует скорость реакции фотоприемника на воздействие светового потока. С качественной стороны инерционность принято выражать постоянной времени фотоприемника. Фотоприемники, используемые в системах прицеливания, характеризуются постоянной времени в  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  с.

Порог чувствительности характеризуется минимальным значением потока излучения, который вызывает на входе фотоприемника сигнал, в заданное число раз ( $m$ ) превышающий уровень шума.

Одной из основных рабочих характеристик является световая характеристика фотоприемника. Она определяет зависимость изменения фототока от величины светового потока неизменного спектрального состава при неизменной величине приложенного напряжения.

Световая характеристика имеет верхний предел ограничения, который обусловлен наличием эффекта усталости светочувствительного слоя. Эффект усталости зависит от значения светового потока и от времени его действия. Он

ограничивает максимально допустимые освещенности и максимально допустимые выходные токи фотоприемников.

Фотоприемники можно разделить на два основных класса: фотоприемники с внешним фотоэффектом и фотоприемники с внутренним фотоэффектом.

Принцип действия фотоприемников с внешним фотоэффектом основан на следующем. При облучении поверхности некоторых материалов потоком фотонов последние, обмениваясь энергией с атомами облучаемого вещества, "выбивают" из них электроны, часть которых уходит в пространство. Если в пространстве существует электрическое поле, то свободные электроны будут двигаться в этом поле, т.е. возникает электрический ток  $I_\phi$  (фототок). По закону Столетова:

$$I_\phi = C\Phi \quad (2.4)$$

где  $\Phi$  - падающий световой поток излучения, лм;

$C$  - коэффициент пропорциональности (чувствительности), А/лм.

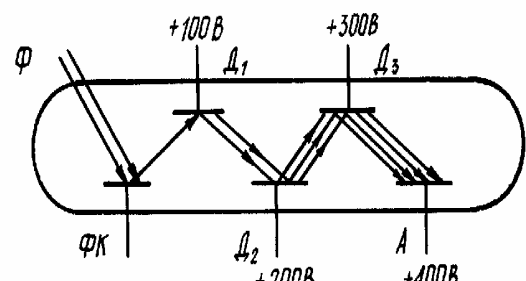
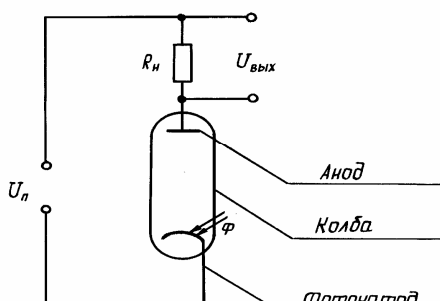
Простейшим устройством этого типа является вакуумный или газонаполненный фотоэлемент, представляющий собой колбу, внутри которой находятся два электрода - анод и фотокатод, к которым прикладывается электрическое напряжение (рис. 28). Фототок, протекая через включенное в анодную цепь фотоэлемента сопротивление нагрузки  $R_n$ , создает на нем падение напряжения  $U = I_\phi R_n$  используемое в качестве выходного сигнала. Если величина принимаемого светового потока мала, то выходное напряжение также получается малым и различить его на фоне теплового шума не всегда возможно.

Преодолеть эту трудность удастся применением другого фотоэмиссионного приемника - фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Действие ФЭУ основано на принципе вторично-электронной эмиссии.

Кроме катода и анода в приборе расположена система промежуточных электродов - динодов, выполненных из металла, способного при попадании на него электрона испускать несколько "вторичных" электронов (рис. 28). Это явление называется электронной эмиссией, а отношение среднего числа эмитируемых электронов к среднему числу падающих электронов - коэффициентом вторично-электронного умножения  $K$ . Приложенное к электродам напряжение создает ускоряющее электрическое поле. Полный коэффициент умножения  $M = K^m$ , где  $m$  - число динодов. Даже при очень малой мощности принимаемого оптического сигнала выходное напряжение ФЭУ намного превышает уровень шума последующего усилительного каскада.

ФЭУ обладает высокой чувствительностью. Порог чувствительности современных умножителей равен  $10^{-8}$ - $10^{-11}$  А/лм.

Частотная характеристика ФЭУ прямолинейна в широком диапазоне частот, так как явление вторичной эмиссии безинерционно и на частотную



характеристику влияют лишь межэлектродные емкости. Постоянная времени ФЭУ равна  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  с. Световые характеристики у ФЭУ нелинейные.

Рис. 27 Фотоэлементы

В системах прицеливания наибольшее применение находит преобразователь типа ФЭУ-115. Он обладает высокой вибропрочностью, способностью регистрировать малые лучистые потоки (до  $10^{-14}$  лм), имеет большой коэффициент умножения  $M = 10^8$  и малую постоянную времени  $T = 10^{-10}$  с.

Область спектральной чувствительности у фотоприемников с внешним фотоэффектом простирается от ультрафиолетовой до ближайшей инфракрасной части спектра. Поэтому в инфракрасном диапазоне используются фотоприемники с внутренним фотоэффектом.

Действие фотоприемников с внутренним фотоэффектом основано на явлении перемещения освобожденных излучением электронов внутри твердого тела, что влечет за собой изменение его электропроводности или создание фото-ЭДС.

Наибольшее распространение из приборов этого класса получили два полупроводника - фоторезисторы (фотосопротивления) и фотодиоды. Работа фоторезисторов основана на явлении фотопроводимости, т.е. на изменении электрического сопротивления полупроводникового элемента под действием светового облучения.

Конструктивно фоторезисторы представляют собой однородную полупроводниковую пластину выполненную из сернистого свинца (тип ФС-А), селенида кадмия (тип ФС-Д), полукристаллов сернистого кадмия (тип ФС-К), монокристаллов сернистого кадмия (тип ФС-КМ), а также некоторых других соединений на основе висмута, таллия и теллура.

Спектральные характеристики фоторезисторов определяются свойствами используемых полупроводниковых материалов. Так, максимум спектральной характеристики для ФС-Д, ФС-К, ФС-КМ лежит в диапазоне волн 0,4 - 0,7 мкм, а для ФС-А - 1,9 - 2 мкм.

Резисторы характеризуются кратностью изменения сопротивления под действием света  $n$ , равной:

$$n = R_m / R_{св} \quad (2.5)$$

где  $R_m$  - темновое сопротивление резистора;

$R_{св}$  - сопротивление фоторезистора, освещаемого световым потоком освещенностью  $E = 200$  лк.

Кратность изменения сопротивления для различных типов фоторезисторов лежит в пределах  $1,2^x - 10^x$ .

Вольтамперные характеристики фотосопротивлений линейны в пределах допустимых мощностей рассеяния, а световая характеристика линейна только при малых уровнях светового потока, практически до освещенностей 200 - 300 лк.

Постоянные времени фоторезисторов составляют  $10^{-2} - 10^{-5}$ . Высокая инерционность приборов ограничивает применение фотосопротивлений в приборах систем прицеливания. На инерционность фоторезисторов не влияет



величина напряжения, однако на этот параметр оказывают влияние освещенность, сопротивление нагрузки, температура.

Характеристики фоторезисторов сильно зависят от температуры окружающей среды. Темновое сопротивление и чувствительность с ростом температуры уменьшается, а постоянная времени увеличивается.

Большим быстродействием обладают фотодиоды. Фотодиоды представляют собой полупроводниковые приборы с  $p-n$  переходом. Фотодиоды могут работать в двух режимах - фотодиодном и фотогенераторном. Последний режим работы в системах прицеливания не используется, поэтому рассмотрим лишь фотодиодный режим.

От внешнего источника питания на прибор подается напряжение, полярность которого препятствует протеканию тока через  $p-n$  переход. Поэтому при отсутствии излучения через фотодиод течет ток  $I_m$  (темновой ток), величина которого достаточно мала ( $I_m=10^{-9}$  А). При попадании в область  $p - n$  перехода фотонов оптического излучения вследствие генерации электронно-дырочных пар ток через диод возрастает и тем больше, чем выше интенсивность облучения.

Характеристики фотодиодов зависят от свойств полупроводниковых материалов, из которых изготовлен  $p - n$  переход. Отечественная промышленность выпускает германиевые и кремниевые фотоприемники. Область чувствительности германиевых приемников занимает видимую коротковолновую и ближнюю средневолновую инфракрасную часть спектра в диапазоне 0,4 - 1,8 мкм с максимумом, приходящимся на длину волны 1,5 мкм. Область чувствительности кремниевых приемников находится в видимой и ближней коротковолновой инфракрасной части спектра от 0,4 до 1,2 мкм с максимумом около 0,9 мкм.

Интегральная чувствительность фотодиодов вычисляется как:

$$Sc\phi = \frac{I_{c\phi} - I_T}{\Delta \Phi}, \quad \text{мкА/лм}, \quad (2.6)$$

где  $I_{c\phi}$  - световой ток фотодиода при освещении его от стандартного источника с цветовой температурой  $T_{цв} = 2360^0$  К;

$I_T$  - темновой ток.

Для кремниевых фотодиодов интегральная чувствительность характеризуется величиной 4 - 7 мкА/лм, германиевых 20 - 25 мкА/лм.

Постоянная времени фотодиодов определяется временем пролета носителей и постоянной времени цепи, образованной емкостью  $p-n$  перехода. Для фотодиодов, применяемых в системах прицеливания, она равна  $(3 \div 5) 10^{-6}$  с.

Характеристики фотодиодов зависят от температуры. Темновой ток зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением от 20 до 60°C в сотни раз. Особенно критичны к изменению температуры германиевые фотодиоды. Так, темновые токи у кремниевых фотодиодов при температуре 80°C на порядок меньше темновых токов германиевых фотодиодов, находящихся при температуре 20°C.

На рис. 29 приведены схемы включения фотодиодов. Фотодиод может рассматриваться как резистор и включается в схемы делителей (рис. 29, а).

Наиболее предпочтительны мостовые измерительные цепи (рис. 29, б), позволяющие в известной степени уменьшить влияние дрейфа темнового тока.

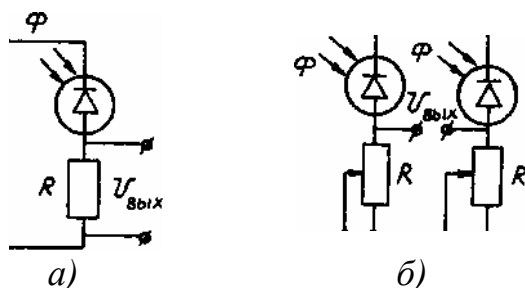


Рис. 29. Схемы включения фотодиодов

В последнее время в системах прицеливания для определения положения отраженного светового сигнала и последующего преобразования его в электрический используются полупроводниковые фотометрические приборы с зарядовой связью (ПЗС), ПЗС представляют собой структуру "металл-окисел-полупроводник" (МОП), которая может осуществлять накопление, и сохранение заряда. Основой ПЗС является МОП-конденсатор (рис. 30, а), состоящий из металлического или подкремниевоего электрода 1, нанесенного на термически окисленную подложку 4 из  $n$  или  $p$  кремния.

Если на электрод подать отрицательный потенциал относительно подложки, то электроны, расположенные в слое кремния, отталкиваясь от электрода, покинут слой кремния. При этом на границе раздела  $SiO_2$ , образуется потенциальная яма для не основных носителей, которая в начальный момент пуста. Заполнение потенциальной ямы не основными носителями осуществляется за счет фотогенерации, которая возникает при попадании на МОП-конденсатор светового потока.

Заряд  $Q$ , накопленный в потенциальной яме, пропорционален освещенности и времени накопления:

$$Q = K\Phi t \quad (2.7)$$

где  $\Phi$  - поток излучения, лм;

$t$  - время действия светового излучения, с;

$K$  - коэффициент преобразования.

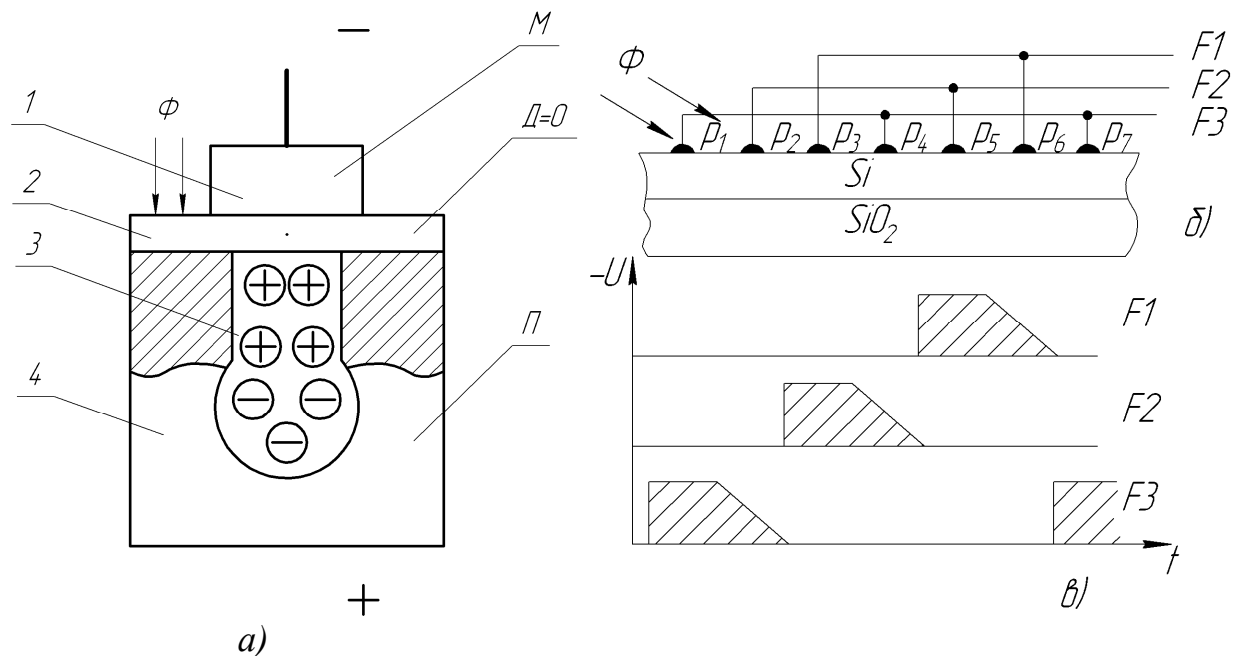


Рис. 29. Фотометрический прибор с зарядовой связью:  
а) МОП-конденсатор; 1- электрод; 2 - окисел; 3 – неосновные носители; 4- объединенный слой; 5- подложка. б) Подключение МОП-конденсаторов к шинами тактового питания; в) управляющее напряжение тактового питания

МОП-конденсаторы собираются в секции. Они располагаются на общем диэлектрическом слое и подложке так близко, что их потенциальные ямы соединяются. МОП-конденсаторы подключены к шинам тактового питания триадами (рис. 30, б).

Если под электродом  $P_1$  вследствие оптической генерации инжектируется заряд, то он после заполнения потенциальной ямы будет распространяться вдоль границы раздела  $SiO_2-Si$  под соседний электрод  $P_2$ , если на него подано напряжение, равное напряжению на электроде  $P_1$  или большее по амплитуде. При уменьшении амплитуда отрицательного напряжения на электроде  $P_1$  заряд полностью перетечет под электрод  $P_2$ . Управляющие напряжения поступают в виде импульсов трапецеидальной формы (рис. 30, в).

Управляя движением потенциальных ям, можно осуществить перенос заряда за дискретные интервалы времени.

Заряды регистрируются регистрами выходной секции. Таким образом, конструкция фотоприемника на основе ПЗС содержит входное устройство, обеспечивающее ввод заряда, секцию переноса - последовательность МОП-конденсаторов и выходное устройство. МОП-конденсаторы объединены в ячейки. Каждая ячейка содержит  $m$  элементов переноса, определяющих фазность прибора. В России используются только трехфазные схемы ( $m = 3$ ), ячейки собираются в секции по строкам и столбцам. Такие секции получили название ПЗС-матрицы.

Например, широко применяемая ПЗС-матрица типа ФПЗС6М состоит из основного светочувствительного массива  $288 \times 256$  элементов с переносом заряда и их светочувствительных сдвиговых регистров по 264 элемента в каждом по разные стороны массива. Размер ячейки не превышает 30 мкм, расстояние между ячейками 2-3 мкм, геометрическое размещение ячеек выдерживается с точностью до 0,1 мкм.

Приборы с зарядовой связью по сравнению с другими типами фотопреобразователей имеют высокое быстродействие, обеспечивают большую точность изменения угловых величин. Разрешающая способность у приборов, построенных на ПЗС-матрице на порядок выше, чем у приборов, имеющих в своем составе фотодиодные преобразователи. ПЗС-матрицы позволяют значительно уменьшить габариты и вес фотоэлектронных приборов. Однако ПЗС-матрицы в большей степени, чем другие полупроводниковые приборы, критичны к изменению температуры. Так, темновой ток при изменении температуры окружающей среды от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+27^{\circ}\text{C}$  увеличивается в 100 раз. Кроме того, ПЗС-матрицы имеют неравномерную чувствительность по диапазону измерения.

### 3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ (АКД)

Фотоэлектрические автоколлимационные датчики (АКД) используются в электрических фотоследящих системах аппаратуры прицеливания и предназначены для определения отклонения нормали к зеркальной поверхности какого-либо контрольного элемента (КЭ) от визирной оси ФЭАК. Принцип действия АКД, как и автоколлимационных зрительных труб, основан на анализе излучающего параллельного светового потока и отраженного от зеркальной поверхности КЭ. Основное отличие АКД от автоколлимационных зрительных труб и коллиматоров состоит в том, что окуляр для визуального наблюдения отраженного изображения заменен системой преобразования светового потока в электрический сигнал - фотоприемником и электронной схемой анализа этого электрического сигнала.

Общая структурная схема АКД представлена на рис. 31. В общем случае ФЭАК состоит из источника светового излучения 4, оптической системы 2, фотоприемника 3, электронной схемы 5, осуществляющей усиление и преобразование электрического сигнала с целью выделения полезной составляющей.

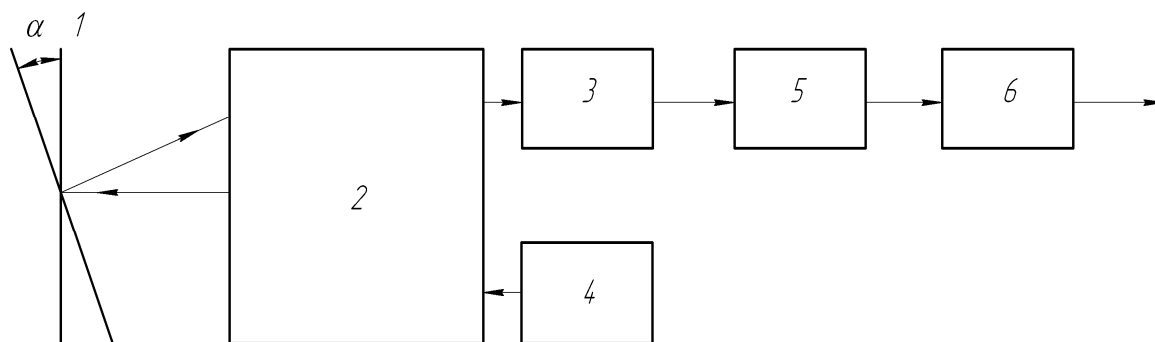


Рис. 31. Общая структурная схема АКД:

1-контрольный элемент; 2-оптическая система; 3-фотоприемник; 4-источник светового излучения; 5- электронная схема усиления и преобразования электрического сигнала; 6- выходное устройство.

#### 3.1. АМПЛИТУДНЫЕ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

В автоколлимационных датчиках систем прицеливания большое применение находят амплитудные фотоэлектрические системы с анализатором изображения в виде зеркальной разделительной призмы. Схема амплитудного АКД приведена на рис. 32.

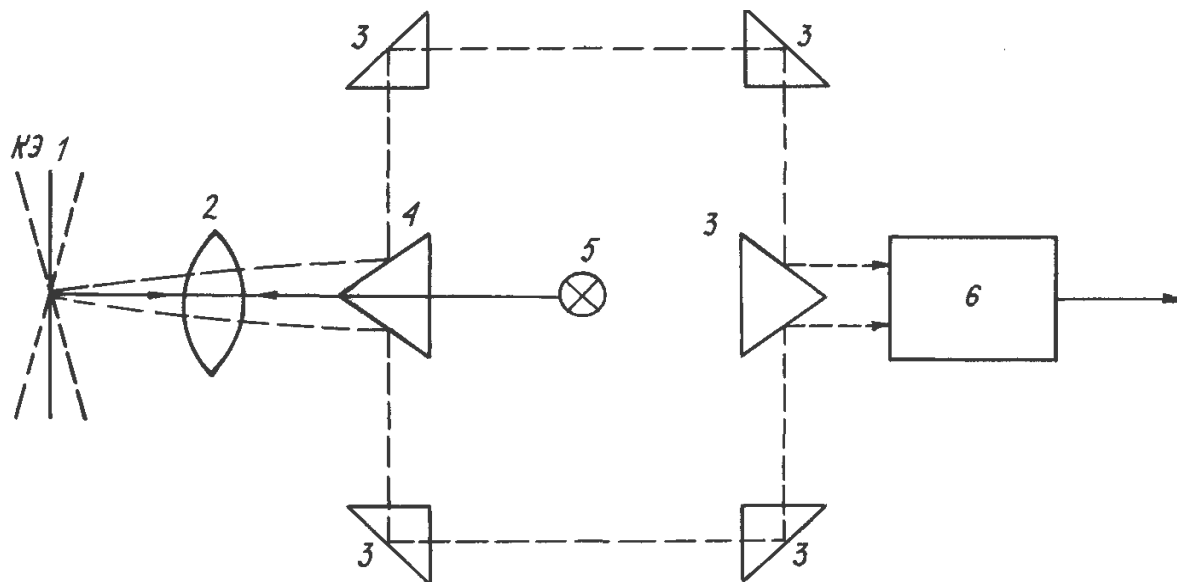


Рис. 32. Амплитудный АКД:

1- контрольный элемент; 2- объектив; 3 - призмы оптического мостика; 4- разделительная призма; 5- источник света; 6- схема преобразования светового потока в электрический сигнал.

Световой поток от источника излучения 5 через разделительную призму 4 попадает на объектив 2. Сформированный объективом параллельный световой пучок засвечивает зеркальную поверхность контрольного элемента 1, отражается от нее, падает на разделительную призму и ребром ее делится на две части. Разделенные части светового потока анализируются схемой преобразования светового потока в электрический сигнал.

В приборах систем прицеливания преобразователи оптического сигнала в электрический строятся по одной из схем: компенсационной схемы, мостовой электронной схемы с выходом по переменному току или постоянному току и схемы, основанной на ПЗС-матрице.

Компенсационная схема, представленная на рис. 33, осуществляет непосредственное преобразование лучистой энергии в электрическую.

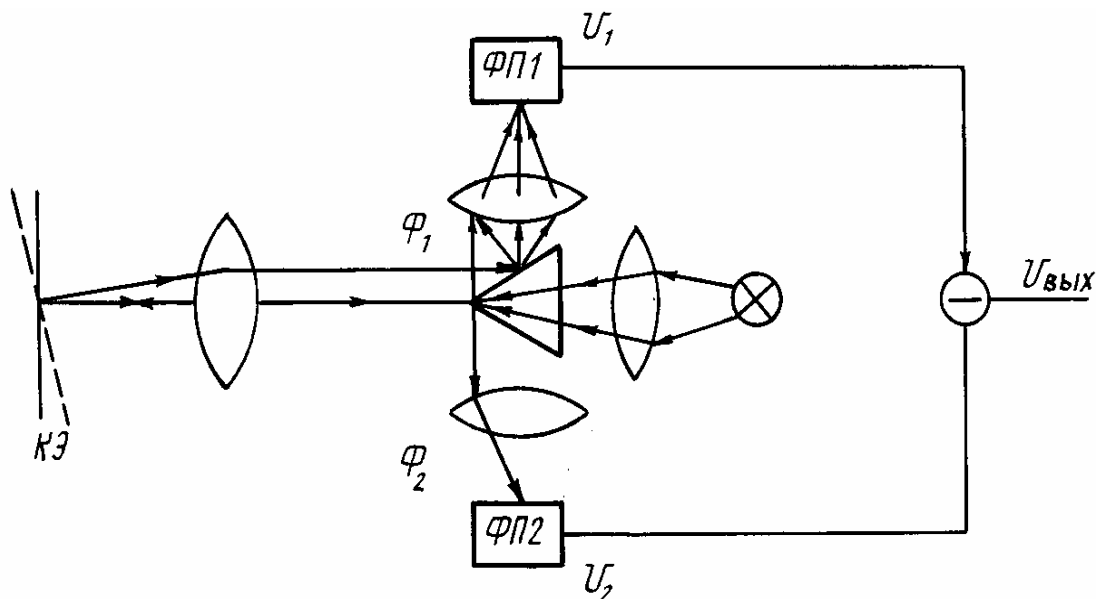


Рис. 33. Амплитудный АКД с преобразователем по компенсационной схеме.

Если визирная ось АКД совпадает с нормалью к зеркалу контрольного элемента, то изображение отраженного светового потока строится на разделительной призме таким образом, что оно делится ее ребром на две равные части. При этом световые потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , попадая на фотоприемники, создают одинаковую освещенность светочувствительных площадок фотоприемников ФП1 и ФП2, а следовательно, и равнозначные сигналы  $U_1$  и  $U_2$ . Приемники включены на вход усилителя по балансной схеме, поэтому при  $U_1=U_2$  на выходе усилителя  $U_{вых} = 0$ . При отклонении КЭ происходит перераспределение частей световых потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , поступающих на фотоприемники. По знаку разностного сигнала можно судить о направлении отклонения плоскости КЭ от визирной оси автоколлиматора.

Вместо разделительной призмы-ножа могут применяться и другие, анализирующие системы.

На рис. 34 приведена схема анализатора, построенного на диодной матрице. Фотодиоды включены парами относительно линии раздела и нагружены на резисторы  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$ .

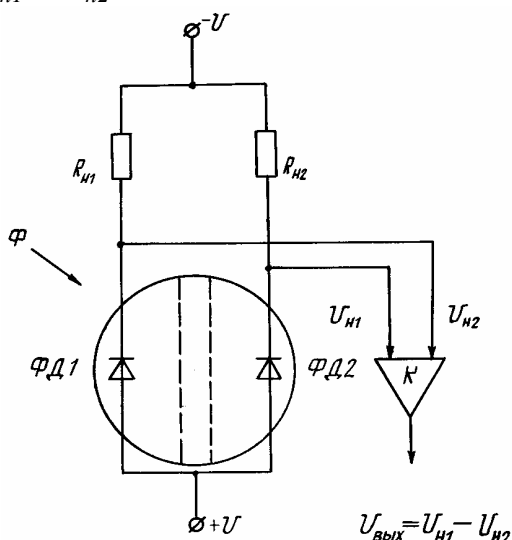


Рис. 34. Анализатор на диодной матрице

Если угол рассогласования между визирной осью АКД и отраженного луча от контрольного элемента не равен нулю, то на резисторах  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$  формируются напряжения  $U_{н1}$  и  $U_{н2}$ , знак разности которых и определяет направление отклонения поверхности КЭ от визирной оси АКД. В рассмотренной схеме возникают погрешности измерения при неодинаковых значениях чувствительности фотоприемников, нарушающих равновесие схемы. Поэтому более предпочтительной является мостовая схема преобразования оптического сигнала в электрический сигнал, приведенная на рис. 35.

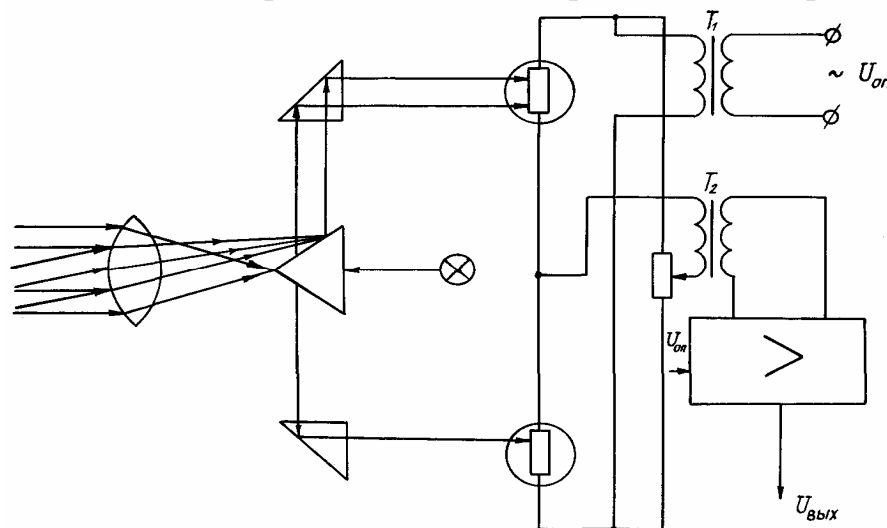


Рис. 35. Амплитудный АКД с мостовой схемой преобразования оптического сигнала в электрический.

Преобразование световых сигналов, отраженных от КЭ, в электрический сигнал осуществляется с помощью фоторезисторов  $R_1$  и  $R_2$ , которые вместе со вторичной обмоткой трансформатора  $T_1$  образуют мостовую схему, сбалансированную в положении перпендикулярности плоскости КЭ к визирной оси АКД. При неодинаковой освещенности катодов фоторезисторов балансировка моста нарушается и в обмотке трансформатора  $T_2$ , включенного в диагональ моста, будет протекать переменный ток, амплитуда которого пропорциональна угловому рассогласованию между КЭ и визирной осью АКД, а фаза определяется направлением рассогласования. Этот сигнал трансформируется в выходную обмотку  $T_2$  и используется для анализа положения плоскости КЭ по отношению к визирной оси АКД.

В некоторых устройствах АКД в качестве основного элемента анализатора применяется разделительная призма-щель (рис.36). Световой поток от источника излучения через конденсор 5 освещает фаску разделительной призмы 4. Фаска призмы расположена в задней фокальной плоскости объектива 2. Так как размеры фаски по сравнению с задним фокусным расстоянием пренебрежимо малы, то можно считать, что по отношению к объективу она является точечным излучателем.

Выходящий из объектива параллельный световой поток  $\Phi_0$ , попадает на зеркальную поверхность контрольного элемента 1, отражается от нее и объективом фокусируется в виде прямоугольного светового штриха в задней фокальной плоскости.

Если обозначить перемещение отраженного от КЭ на грани разделительной призмы изображение фаски за  $a$ , а фокусное расстояние объектива за  $f_0$ , то на основании рис. 35 можно записать:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = a/f_0 \quad (3.1)$$

Отсюда для малых углов  $\alpha$  имеем:

$$a = 2f_0\alpha \quad (3.2)$$

Таким образом, смещение штриха по грани разделительной призмы пропорционально углу отклонения нормали к КЭ от визирной оси АКД.

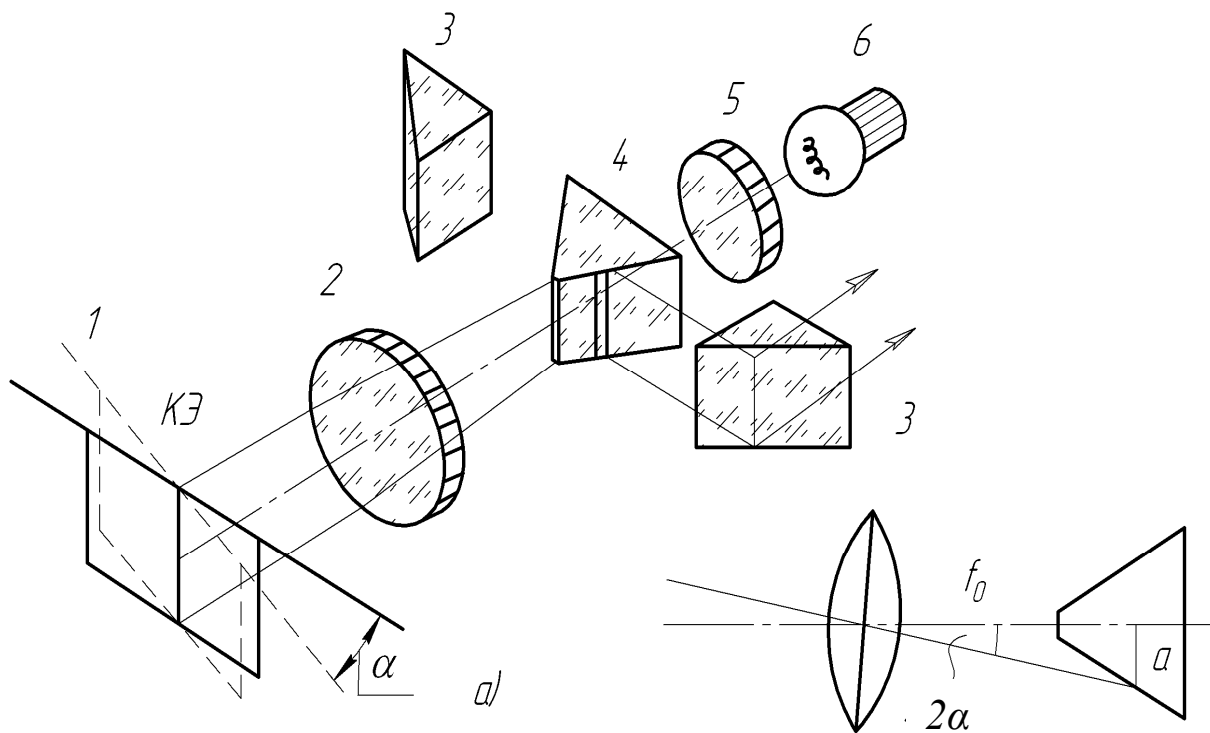


Рис. 36. Амплитудный АКД с разделительной призмой-щелью:  
1-контрольный элемент; 2- объектив; 3 - призмы оптического мостика; 4 -  
разделительная призма-щель; 5- конденсор; 6- источник света.

Обозначим ширину прозрачной фаски  $\delta$ , ширину гипотенузной грани разделительной призмы  $\ell$ , а высоту призмы  $h$  (рис. 36).

Если визирная ось АКД ортогональна к поверхности контрольного элемента ( $\alpha = 0$ ), то отраженный световой поток  $\Phi'$  сфокусируется в основном на фаске разделительной призмы. На боковые зеркальные грани разделительной призмы попадают световые помехи  $\Phi_{n1}$  и  $\Phi_{n2}$ . При наличии угла рассогласования между выходящим из ФЭАК световым потоком и нормалью к контрольному элементу ( $\alpha \neq 0$ ) отраженный световой поток попадает на одну из боковых граней, например, на правую (рис. 36). В этом случае при смещении светового пятна на величину  $\alpha < \delta$  (световой поток  $\Phi'$  частично еще засвечивает фаску разделительной призмы) отраженные от боковых граней световые потоки будут равны:

$$\begin{aligned} \Phi'_1 &= \Phi_{n1} + \frac{\Phi^e}{\delta} a, \\ \Phi'_2 &= \Phi_{n2} \end{aligned} \quad (3.3)$$



При дальнейшем увеличении угла  $\alpha$  отраженное световое пятно полностью сместится на боковую грань и отраженные световые потоки будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned}\Phi'_1 &= \Phi_{n1} + \Phi', \\ \Phi'_2 &= \Phi_{n2}\end{aligned}\quad (3.4)$$

Формула (3.4) будет справедлива до тех пор, пока отраженное световое пятно не начнет смещаться с боковой грани разделительной призмы. На рис. 37 приведен график изменения выходного сигнала фотоэлектрического АКД в зависимости от рассогласования между визирной осью АКД и ортогонально к отражательной поверхности контрольного элемента.

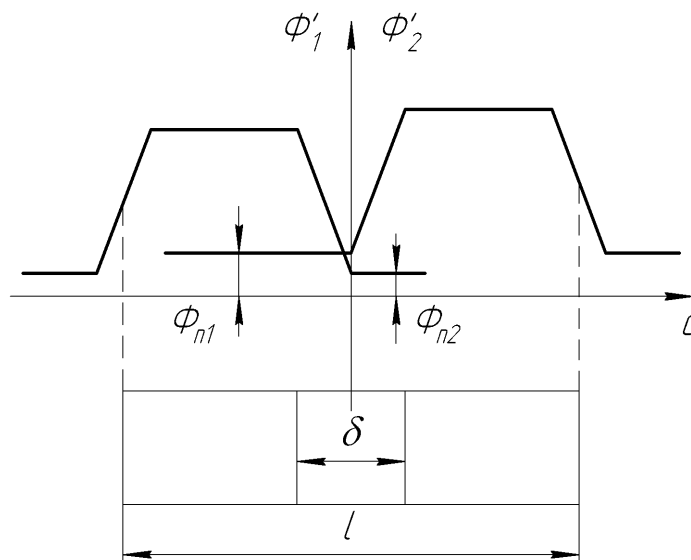


Рис. 37. График изменения выходного сигнала АКД.

Рассмотрим погрешности АКД. Суммарная погрешность АКД, изображенного на рис. 36, будет в основном определяться его пороговой чувствительностью, нестабильностью контрольного элемента, случайным искажением электрического профиля светового луча в плоскости призмы анализатора, угловой нестабильностью энергетической оси излучателя, погрешностью работы фотоприемника и компенсатора.

Считая эти погрешности независимыми, общая средняя квадратическая погрешность в первом приближении может быть определена следующим образом:

$$\sigma_{акд} = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{кэ}^2 + \sigma_u^2 + \sigma_a^2 + \sigma_0^2 + \sigma_{фн}^2 + \sigma_k^2} \quad (3.5)$$

где:  $\sigma_n$  - средняя квадратическая погрешность, обусловленная пороговой чувствительностью фотоэлектрического анализатора положения:

$$\sigma_n = \frac{KS_n \Delta \Phi}{f_{об} \Phi_0} \quad (3.6)$$

где:  $K$  - коэффициент, зависящий от энергетического профиля светового пучка;

$S_n$  - площадь светового пучка;

$\Delta \Phi$  - порог чувствительности фотоприемника;

$\Phi_0$  - величина светового потока;

$\sigma_{кэ}$  - средняя квадратическая погрешность, обусловленная нестабильностью контрольного элемента;

$\sigma_u$  - средняя квадратическая ошибка, обусловленная случайным искажением электрического профиля светового пучка в плоскости призмы анализатора;

$\sigma_a$  - средняя квадратическая погрешность, вызванная угловой нестабильностью светоделительной поверхности ( $\sigma_a$ ), рад:

$$\sigma_a = \frac{4\sigma_a' \cdot a}{f_{об}} \quad (3.7)$$

где  $a$  - перемещение светового лучка на грани разделительной призмы;

$\sigma_o$  - средняя квадратическая погрешность, связанная с угловой нестабильностью энергетической оси излучателя ( $\sigma_o$ ), рад:

$$\sigma_o = \frac{2\sigma_o' \cdot f_k}{f_{об}} \quad (3.8)$$

где:  $f_k$  - фокусное расстояние конденсора;

$\sigma_{\phi n}$  - средняя квадратическая погрешность преобразователя;

$\sigma_k$  - средняя квадратическая погрешность, обусловленная погрешностью компенсатора ( $\sigma_k$ ), устройства, применяемого в отдельных типах автоколлимационных приборов, способного перемещаться в плоскости измеряемых углов, перпендикулярно оптической оси АК, рад:

$$\sigma_k = \frac{L_k}{f_{об}} \sigma_k' \quad (3.9)$$

где:  $L_k$  - линейный размер, характеризующий положение компенсатора по отношению к объективу.

Подставляя (3.6) - (3.9) в выражение (3.5), получаем:

$$\sigma_{акд} = \frac{1}{f_{об}} \sqrt{\frac{K^2 S_n^2 \Delta \Phi^2}{\Phi_0^2} + \sigma_{кэ}^2 f_{об}^2 + \sigma_u^2 f_{об}^2 + 4\sigma_o'^2 f_k^2 + \sigma_{\phi n}^2 f_{об}^2 + 16\sigma_a'^2 a^2 + L_k^2 \sigma_k'^2} \quad (3.10)$$

Уменьшение каждой из составляющих суммарной погрешности АКД до минимально возможной величины связано с выбором типов источников излучения, вида фотоэлектрического анализатора положения, оптических узлов, способов обработки сигналов и т.п.

Рассмотренные АКД позволяют с точностью  $\sigma_{акд}$  определить направление отклонения нормали КЭ относительно оптической оси автоколлиматора. Существенным недостатком АКД является его низкая помехозащищенность. Источниками помех служат посторонние засветки, попадающие в поле зрения АКД, поэтому такими приборами можно пользоваться лишь в условиях полной темноты.

## 3.2. АМПЛИТУДНО - ФАЗОВЫЕ АКД

Амплитудно-фазовые АКД менее критичны к помехам, возникающим при посторонних засветках автоколлимационного канала. Это свойство достигается путем применения модуляции отраженных от разделительной призмы световых потоков.

Функциональная схема амплитудно-фазового АКД приведена на рис. 38. В отличие от схемы, рассмотренной в п. 3.1, потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  модулируются механическим модулятором 3, представляющим собой диск с прорезями. Диск приводится во вращение двигателем 9. Диск модулятора монтируется таким образом, чтобы потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  поочередно перекрывались.

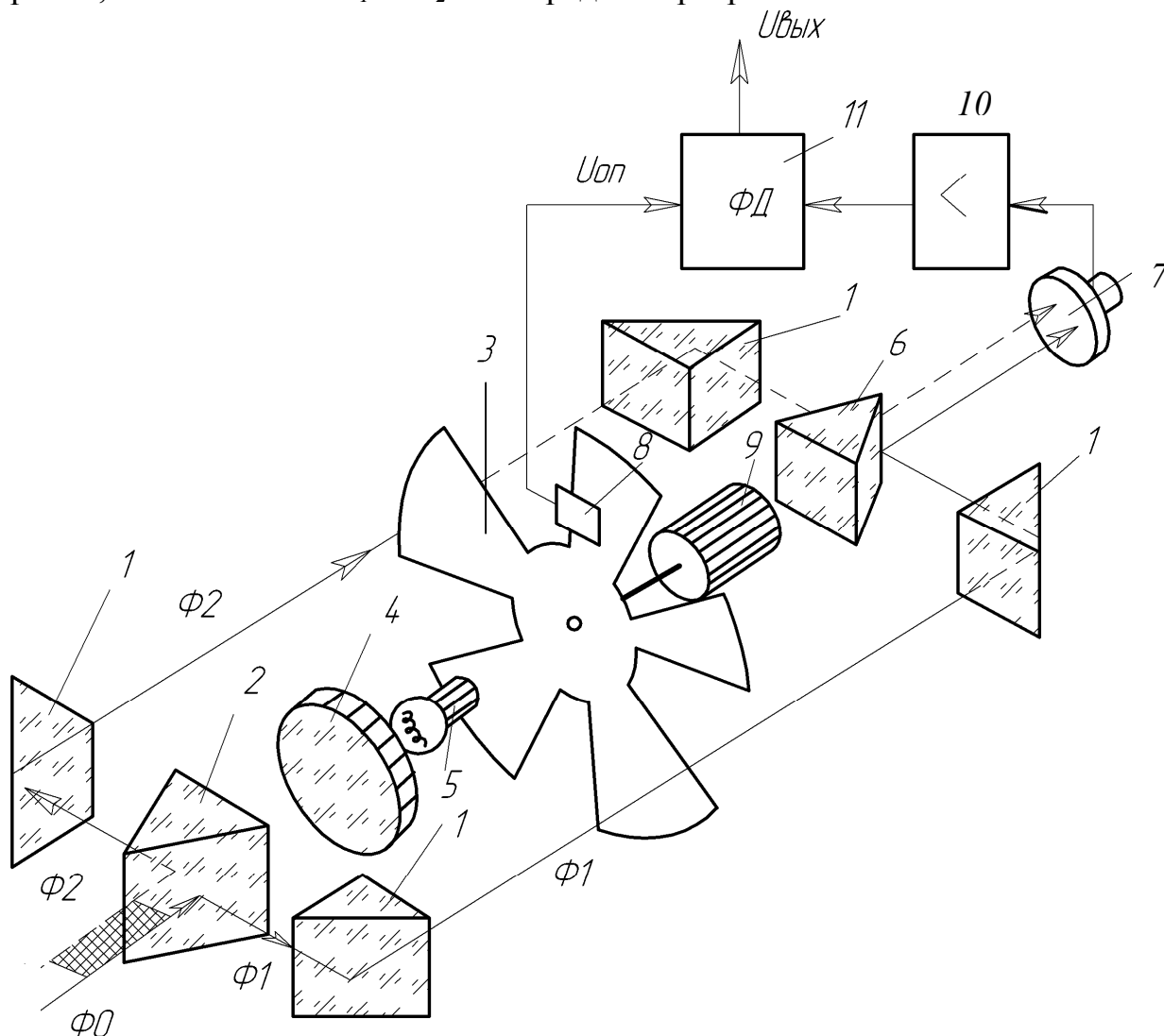


Рис. 38. Амплитудно-фазовый АКД:

1- призмы оптического мостика; 2-разделительная призма; 3- диск модулятора; 4-объектив; 5 - источник света; 6 -суммирующая группа; 7 - фотоприемник; 8 - датчик опорного напряжения; 9 - привод модулятора; 10- усилитель; 11- фазовый детектор.

Работа схемы поясняется эпюрами, приведенными на рис. 39. Если угол рассогласования между перпендикуляром к КЭ и внутренней осью АКД равен нулю, то изображение ребра разделительной призмы, отразившись от КЭ, вновь попадает на ребро и гасится на нем. Часть потока  $\Phi_0$  вследствие некоторой расфокусировки попадает на рабочие зеркальные грани разделительной призмы 2 (рис. 38) и в виде световых потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  расходятся по двум каналам.

Потоки модулируются модулятором 3 частотой  $\omega_0$  в противофазе (рис. 39, а). С помощью призмы 6 (рис. 38) они попадают на фотоприемники 7 в разные моменты времени. Снимаемый с фотоприемника сигнал после усиления в узкополосном усилителе подается на фазовый демодулятор 11, на второй вход которого поступает напряжение опорной частоты. Опорное напряжение

задается датчиком 8, индукционно (или фотоэлектрически) связанным с диском модулятора и потому частота его ( $\omega_0$ ) зависит от скорости вращения модулятора.

При равенстве световых потоков ( $\Phi_1 = \Phi_2$ ) выходной сигнал фазового детектора равен нулю.

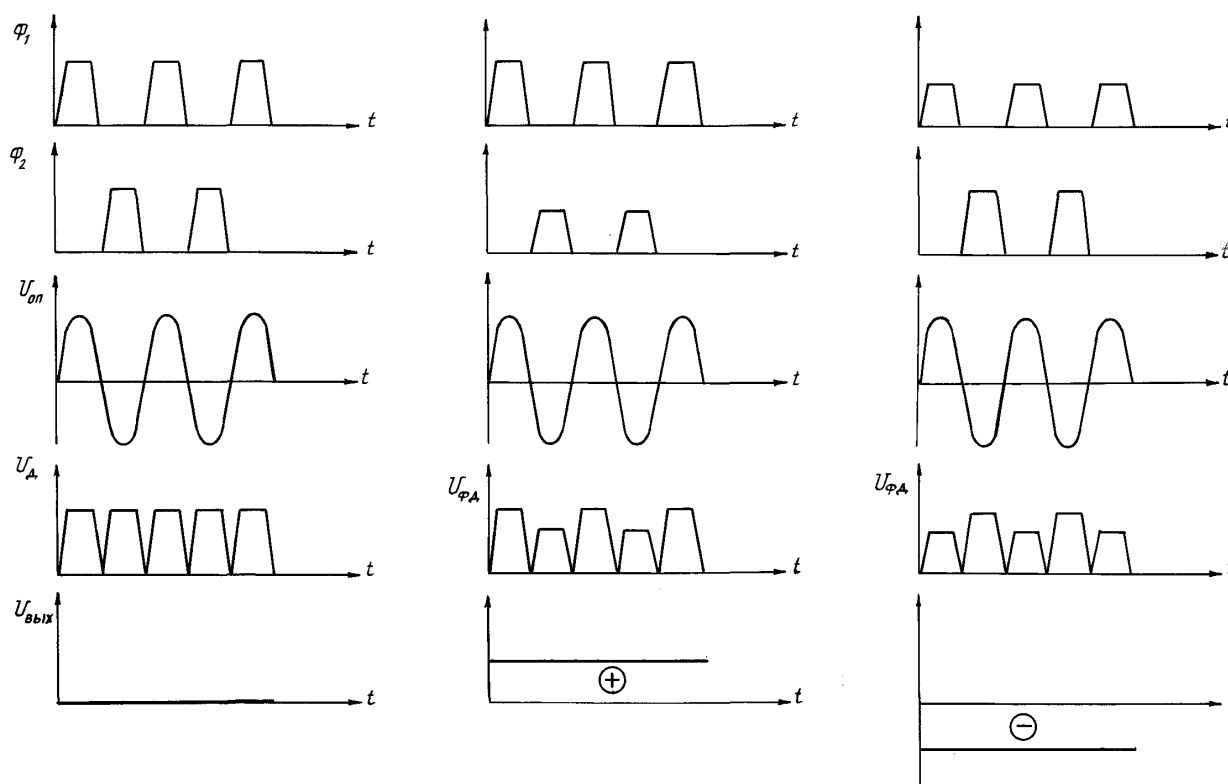


Рис. 39. Эпюры выходного сигнала с фазового детектора

Если контрольный элемент по отношению к визирной оси ФЭАК повернут, например, против хода часовой стрелки ( $\alpha > 0$ ), то равенство световых потоков будет нарушено,  $\Phi_1 > \Phi_2$  (рис. 39, б). При этом на выходе фазового детектора появится постоянный сигнал, амплитуда которого будет определяться величиной угла поворота КЭ, а полярность - направлением поворота.

При изменении направления поворота КЭ ( $\alpha < 0$ )  $\Phi_1 < \Phi_2$  (рис. 39, в) выходной сигнал с фазового детектора изменит полярность.

### 3.3. ЧАСТОТНО - ВРЕМЕННОЙ АКД

Функциональная схема частотно-временного АКД приведена на рис. 40. Он предназначен для определения взаимного положения, ребра зеркальной прямоугольной призмы 1 и линии, проходящей через точки  $T_1$  и  $T_2$ , зафиксированные точечными источниками параллельного света 2. Световые потоки от источников проходят через модуляторы 3 и модулируются частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Промодулированные световые потоки попадают на прямоугольную призму, положение ребра которой по отношению к линии, зафиксированной точечными источниками, определяется. Отраженные световые потоки фокусируются в плоскости анализатора 4, представляющего собой диск с

отверстиями, приводимый во вращение двигателем 5 и регистрируются фотоприемником. Дальнейшая обработка информации осуществляется в блоке управления, в состав которого входят фильтры 9, электронные реле 10, вентили 11 и триггеры 12.

Работа схемы состоит в следующем. Если ребро прямоугольной призмы перпендикулярно линии точечных источников, то отраженные от ее катетных граней световые потоки параллельны друг другу и все вентили блока управления заперты электронным реле.

Если ребро призмы не перпендикулярно линии точечных источников, то отраженные от призмы векторы лучей, модулированных частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , не параллельны друг другу. Определение этого углового рассогласования осуществляется путем его преобразования во временной промежуток.

Анализатор вращается с постоянной скоростью, поэтому на его выходе возникают пачки световых импульсов, временной промежуток между которыми пропорционален угловому рассогласованию (см. рис. 40, б). Электрические импульсы, снимаемые с приемника излучения, подвергаются преобразованию.

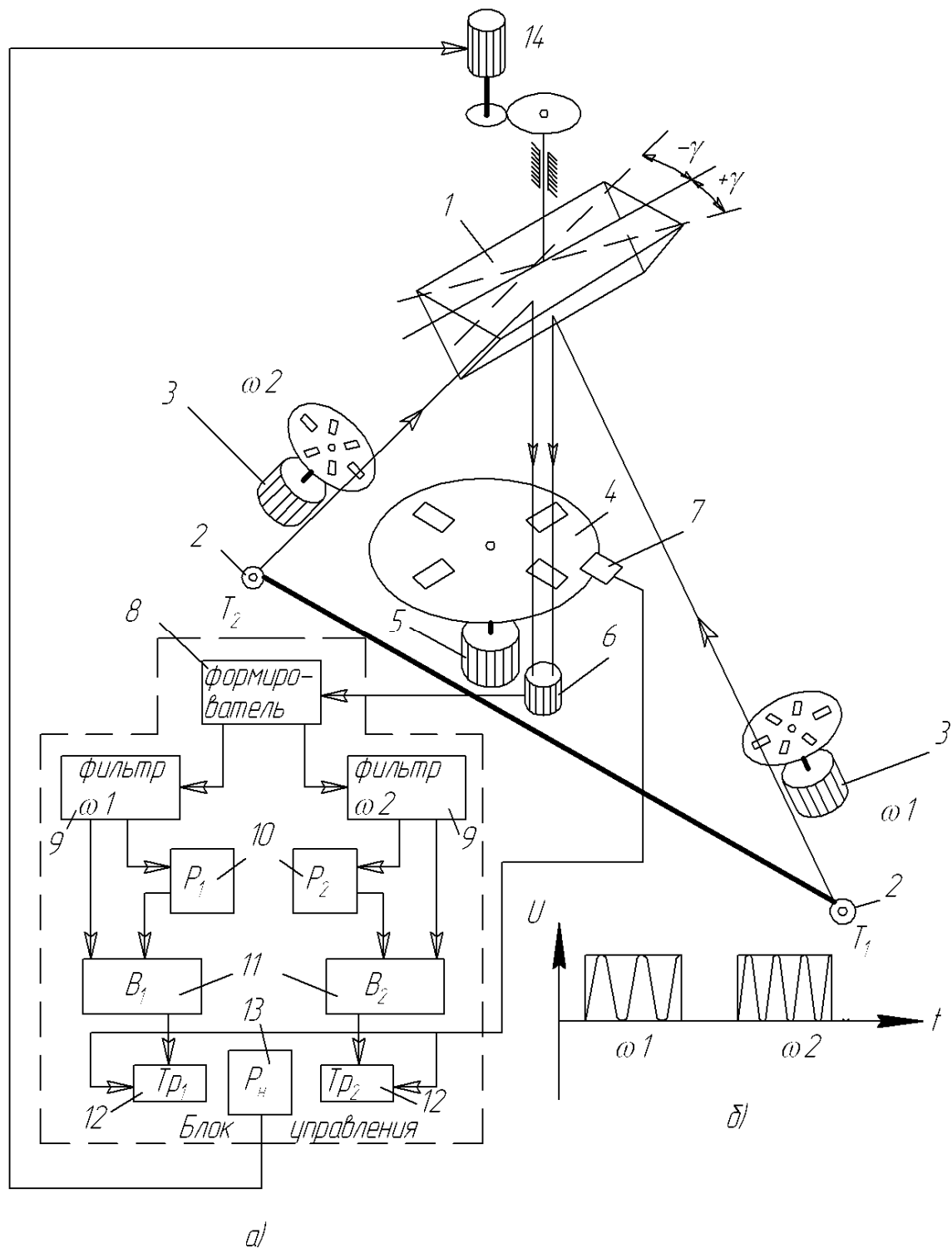


Рис. 40. Частотно-временной АКД:

1 - прямоугольная призма; 2- точечные источники света; 3 -модулятор; 4 - анализатор; 5- привод анализатора; 6 - фотоприемник; 7- датчик опорного напряжения; 8- формирователь; 9- фильтры; 10- электронные реле; 11-вентили; 12-триггеры; 13 - релейный блок; 14- двигатель отработки

Модуляция в источниках света на двух, различных частотах необходима для определения знака рассогласования. Если первым приходит импульс, модулированный частотой  $\omega_1$  то знак рассогласования положителен, а если первым приходит импульс частоты  $\omega_2$ , то он отрицателен. Различие импульсов по частоте проводится в блоке управления. Если, например, имеется отклонение контрольного элемента от ортогонали к линии точечных источников вправо ( $+\gamma$ ), то первым от приемника излучения в блок управления

поступает импульс, модулированный частотой  $\omega_1$ . В состав блока управления входит блок фильтров 9, настроенных на частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Фильтр, настроенный на частоту  $\omega_1$ , пропустит лишь импульс, модулированный частотой  $\omega_1$ , который в последующем детектируется, дифференцируется и ограничивается по амплитуде. Импульс по тракту  $\omega_1$  включает электронное реле  $P_1$ , которое открывает клапан  $B_1$ , управляющий работой триггера  $T_1$ , на второй вход триггера поступает сигнал с датчика, установленного на диске анализатора. Такое инженерное решение исключает ложное срабатывание системы при наличии различных помех. Триггер управляет работой релейного блока  $P_n$ , который формирует команду «Влево» на исполнительный двигатель 14 отработки информации. Исполнительный двигатель будет поворачивать контрольный элемент до устранения углового рассогласования.

При отклонении прямоугольной призмы в противоположную сторону изменится последовательность чередования импульсов, модулированных частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , поступающих в блок управления. В этом случае первым будет следовать импульс, модулированный частотой  $\omega_2$ , который после преобразования в своем тракте вызовет срабатывание реле  $P_2$  и формирование команды "Вправо" на исполнительный двигатель.