

СХЕМЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ФИКСАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ И СОВМЕЩЕНИЯ ДВУХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. Новиков, А. И. Бирулин, Ю. Ф. Сульженко, В. И. Коржов

Киев

В системах измерения или стабилизации положения (перемещения) объекта, в которых координата его представлена линейным интервалом между изображениями двух светящихся штрихов, для автоматической выработки отсчетного либо управляющего сигнала необходимы точная фиксация границ линейного интервала или точное совмещение изображений штрихов. Эти задачи могут быть решены фотоэлектрическими устройствами со сканирующей разверткой и с помощью фотометрических следящих устройств. Рассмотрим схемы и особенности некоторых устройств этого типа.

На рис. 1 приведена схема координатно-измерительного устройства со сканирующей разверткой [1].

Линейное расстояние между штрихами 1 и 2 (рис. 1, а) по горизонтали представляет измеряемую координату, а относительное расположение изображений определяет ее знак. Для различия изображений и выделения их на фоне световых помех используется амплитудная модуляция световых потоков, строящих изображения штрихов. Световой поток одного штриха модулируется частотой f_1 , другого — частотой f_2 . В процессе сканирования вдоль оси x щель 3 последовательно пропускает имеющиеся в поле зрения световые сигналы на фотоприемник 4, преобразующий их в серии электрических импульсов $U_{\text{фп}}$ частоты f_1 для изображения штриха 1 и частоты f_2 для изображения штриха 2 (рис. 1, б). Сигналы, снятые с фотоприемника, фильтрами 5 и 6 разделяются на два канала: канал частоты f_1 и канал частоты f_2 . После детекторов 7 и 8 и усилителей 9 и 10 сигналы поступают в схему формирования 11, где формируются электрические сигналы U_y , определяющие границы временного интервала, пропорционального измеряемой координате. Положение этих сигналов может соответствовать любым идентичным точкам огибающих серий фотоэлектрических импульсов от одного и другого изображений [2]. Поскольку размеры исходных изображений штрихов могут быть неодинаковыми или же непропорционально изменяться в процессе измерения, то возникает погрешность определения границ временного интервала. Рассмотрим это подробнее.

Положим, что формирование сигналов, определяющих границы интервала, происходит в точках, находящихся на передних или задних фронтах огибающих серий фотоэлектрических импульсов. Тогда полученный временной интервал

$$T = k_1 l,$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, равный

$$k_1 = \frac{1}{V_{\text{ск}}} \text{ сек/см}, \quad (2)$$

а l можно представить как

$$l = L + \frac{b_1 - b_2}{2}, \quad (3)$$

где b_1 и b_2 — размеры первого и второго изображений в направлении сканирования щели;

L — расстояние между серединами изображений, пропорциональное измеряемому углу α ,

$$L = k_2 \alpha. \quad (4)$$

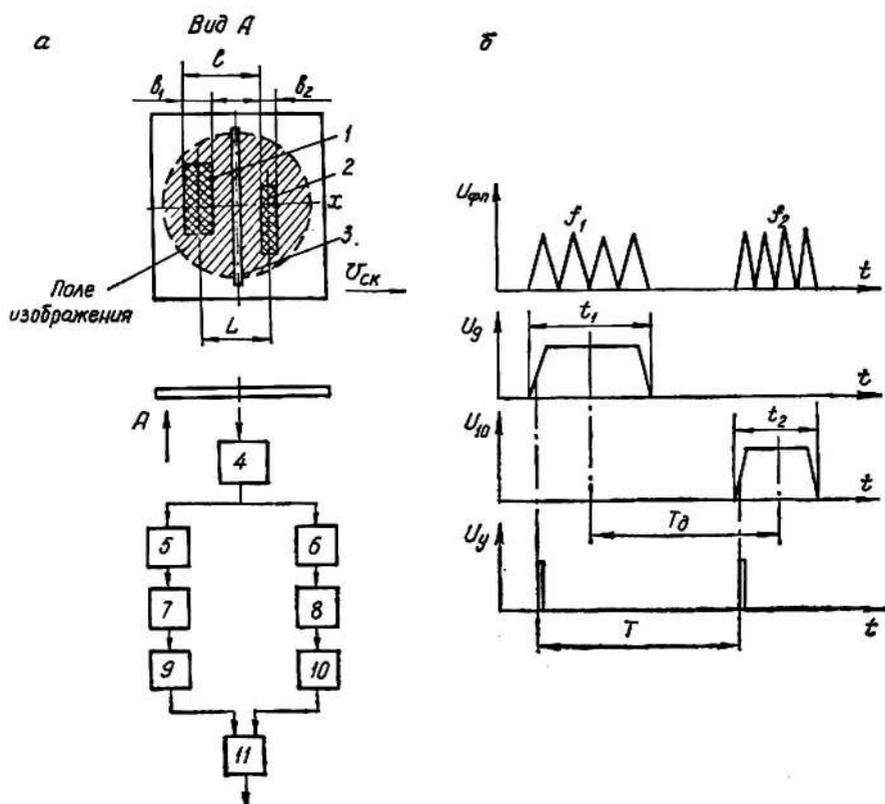


Рис. 1.

Здесь k_2 — коэффициент пропорциональности, характеризующий оптическую систему. С учетом равенства (3) выражение (1) можно записать в виде

$$T = k_1 L + k_1 \frac{b_1 - b_2}{2}, \quad (5)$$

а с учетом (2) — в виде

$$T = T_0 + \frac{t_1 - t_2}{2}, \quad (5')$$

где T_0 — временной интервал, пропорциональный измеряемому углу; t_1 и t_2 — длительность серий импульсов, полученных от изображений 1 и 2 соответственно.

Таким образом, полученный временной интервал, как это видно из уравнений (5) и (5'), точно соответствует измеряемой координате только

в том случае, когда второй член уравнений равен нулю, т. е. $b_1 = b_2$ или, что то же, $t_1 = t_2$. Но так как размеры изображений штрихов неодинаковы ($b_1 \neq b_2$), то фиксируются границы линейного или временного интервала с погрешностью, равной

$$\Delta L = l - L = \frac{b_1 - b_2}{2}, \quad (6)$$

или

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{t_1 - t_2}{2}. \quad (6')$$

Использование призмных анализаторов поля изображений позволяет частично или полностью исключить указанную погрешность. Ниже приведено ряд схем, подтверждающих это. Все эти схемы используют так называемый фотометрический принцип регистрации, заключающийся в разделении и последующем сравнении частей разделенного светового потока [3], причем отсчетный сигнал формируется в момент равенства разделенных световых потоков.

Схема со сканирующей разделительной призмой

Схема анализа поля зрения для этого случая приведена на рис. 2. В процессе равномерного сканирования вдоль оси x призма 3 (рис. 2, а)

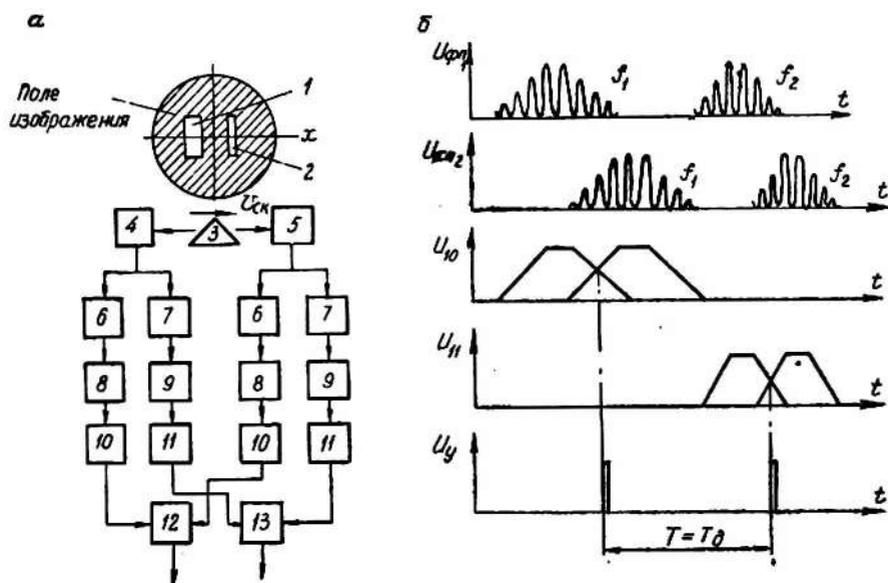


Рис. 2.

делит и направляет световые потоки изображений 1 и 2 на два фотоприемника 4 и 5. С фотоприемников снимаются электрические сигналы $U_{фп1}$ и $U_{фп2}$ в виде серий импульсов частоты f_1 и частоты f_2 (рис. 2, б). Фильтры 6 и 7 сигналы разделяют на два канала: канал частоты f_1 и канал частоты f_2 . После усилителей 8, 9 и детекторов 10 и 11 сигналы каналов одинаковой частоты поступают на сравнивающие устройства 12 и 13, где в моменты равенства мгновенных значений сигналов формируются два электрических импульса границ временного интервала T .

На рис. 3 приведена осциллограмма формирования электрического импульса границы временного интервала. Положение границ интервала соответствует моментам деления световых потоков изображений 1 и 2 ребром призмы на равные части, поэтому неравенство или непропорциональное изменение размеров изображений в процессе измерения в принципе не влияет на длительность полученного временного интервала. Он всегда должен соответствовать линейному расстоянию между серединами изображений штрихов.



Рис. 3.

Следует обратить внимание на выбор размера разделительной призмы. В этой схеме призма должна быть такой, чтобы размер ее гипотенузной

грани был заведомо больше размера наибольшего изображения. В противном случае момент равенства сигналов, в котором должен формироваться электрический импульс границы временного интервала, не будет соответствовать середине изображения.

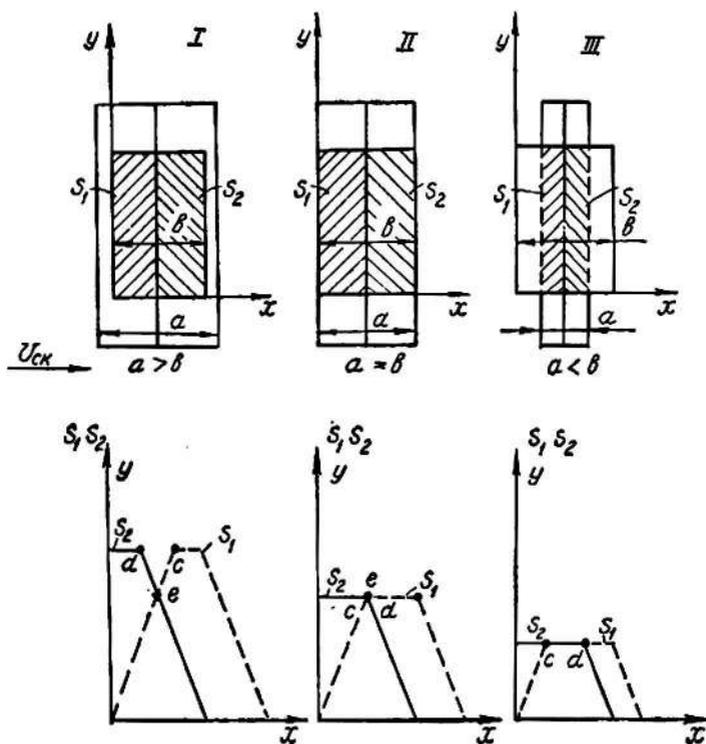


Рис. 4.

На рис. 4 показано три варианта соотношения размеров a гипотенузной грани разделительной призмы и b — наибольшего изображения штриха (представлен вид на призму и изображение со стороны делительного ребра призмы). Для каждого варианта построены графики зависимости площадей S_1 и S_2 разделенного изображения от перемещения призмы x . За начальное положение делительного ребра призмы $x = 0$ принята левая граница изображения.

Из графиков видно, что вариант I ($a > b$) несколько хуже с точки зрения световых помех, так как для него отношение сигнал — помеха имеет меньшую величину, чем для вариантов II и III. Под сигналом понимается весь световой поток изображения штриха, упавший на отражающие грани призмы, под световой помехой — весь световой поток фона, падающий на те же грани призмы. Вариант II ($a = b$) можно назвать предельным, потому что в этом случае точка e равенства площадей $S_1(x)$ и $S_2(x)$ совпадает с точками перехода их графиков в горизонтальные участки. Дальнейшее уменьшение призмы приводит к превращению «точки» (момента) равенства площадей в отрезок cd — вариант III ($a < b$).

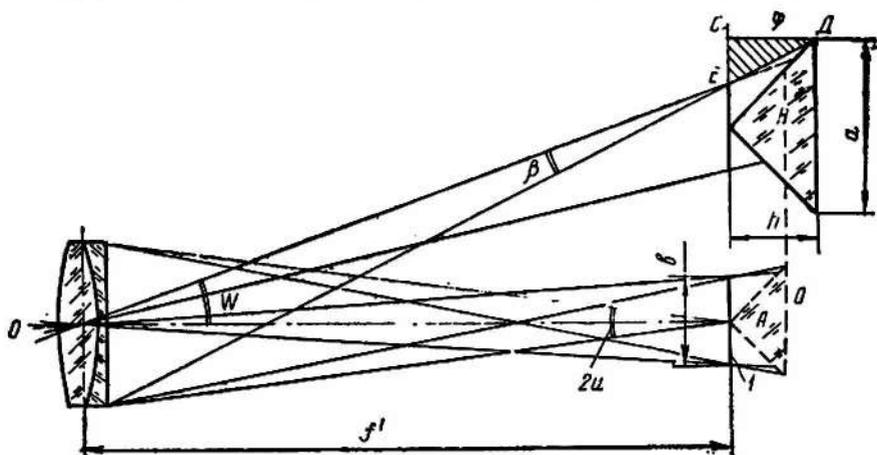


Рис. 5.

Заслуживают внимания первый и второй варианты. По световым помехам вариант II лучше, однако точка e равенства площадей в этом случае совпадает с границами переднего и заднего фронтов (c и d) их графиков, что имеет важное значение при обработке сигналов в некоторых блоках электронного канала (усилителях, детекторах). Чтобы сопоставить эти варианты и несколько конкретизировать неравенство $a < b$ с точки зрения уверенной фиксации момента равенства световых потоков разделенного изображения штриха, обратимся к геометрии световых пучков, строящих это изображение.

На рис. 5 показан ход световых лучей, строящих изображение штриха через объектив O . Из рисунка видно, что даже в случае, когда изображение I находится в центре поля зрения (положение призмы A), размер a гипотенузной грани призмы должен быть больше размера b изображения, чтобы отражающие грани призмы могли принять весь световой поток изображения, разделенного на равные части. Если же изображение находится на краю поля зрения (положение B), то гипотенузная грань призмы должна быть еще больше:

$$a = b + 2EC. \quad (7)$$

Как видно из треугольника CDE , сторона

$$EC = h \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где

$$h = \frac{a}{2}. \quad (9)$$

Подставив выражения (8) и (9) в (7) и решив полученное выражение относительно a , получим

$$a = \frac{b}{1 - \operatorname{tg} \varphi}. \quad (10)$$

Из рисунка видно, что угол

$$\varphi = W + \beta, \quad (11)$$

где W — угол, равный половине угла поля зрения оптической системы; β — угол, который при небольших углах поля зрения можно считать равным апертурному углу U объектива.

Таким образом, оптимальный размер гипотенузной грани призмы a_0 лежит в диапазоне, ограниченном

$$\frac{b}{1 - \operatorname{tg} \varphi} < a_0 < 2b^*. \quad (12)$$

Схема со следящей разделительной призмой и подвижными изображениями штрихов

Данная схема применяется в том случае, когда для автоматической стабилизации углового положения объекта необходимо совмещать изображения штрихов, причем размеры изображений штрихов могут значительно отличаться друг от друга. Очевидно, что наиболее точным совмещением этих изображений является совмещение их по «центрам тяжести» (осям симметрии).

Схема анализа поля зрения для этого случая изображена на рис. 6. Призма 3 постоянно следит за серединой изображения штриха, световой поток которого модулирован частотой f_1 . Фотоэлектрическая следящая система включает в себя фотоприемники 4 и 5, фильтры частоты f_1 6, усилители 8, детекторы 10, сравнивающее устройство 12, формирователь управляющего сигнала 14 и исполнительный элемент 16, перемещающий призму 3.

Световой поток изображения второго штриха, модулированный частотой f_2 , является сигналом для второй фотоэлектрической следящей системы. Система включает в себя ту же призму 3 и фотоприемники 4 и 5, а также фильтры частоты f_2 7, усилители 9, детекторы 11, сравнивающее устройство 13, формирователь управляющего сигнала 15 и исполнительный элемент 17, который перемещает изображения штрихов 1 и 2 до тех пор, пока они одновременно разделятся призмой на равные части. Размер призмы должен быть таким, чтобы каждая ее отражающая грань полностью перекрывала поле изображений штрихов 1 и 2.

В схемах, представленных на рис. 2 и 6, для регистрации световых сигналов используются два фотоприемника. Известно, что дифференциальные фотоэлектрические измерительные устройства с двумя фотоприемниками имеют довольно существенный недостаток — различие в параметрах фотоприемников приводит к погрешности измерения.

При наличии двух фотоприемников основной причиной погрешности является различие в их интегральных чувствительностях. Определим выражение этой погрешности для описанных схем.

Следует, однако, отметить, что в рассматриваемых схемах результат измерения фиксируется несколько иначе чем обычно. Здесь мы имеем две

* При угле $\varphi = 27^\circ$ ($\operatorname{tg} 27^\circ \approx 0,5$) неравенство (12) теряет смысл. Однако в реальных устройствах рассматриваемого типа этот угол не превышает 10° .

фотоэлектрические следящие системы: одна настроена на частоту f_1 , другая — на частоту f_2 . Системы работают одновременно, имея общие фотоприемники. Поэтому положения электрических импульсов, соответствующие моментам деления изображений штрихов на равные части, например, в схеме со сканирующей призмой (рис. 2), будут иметь ошибки одинакового знака. Ошибка временного интервала между импульсами определится разностью ошибок положений импульсов. Чтобы лучше понять, восполь-

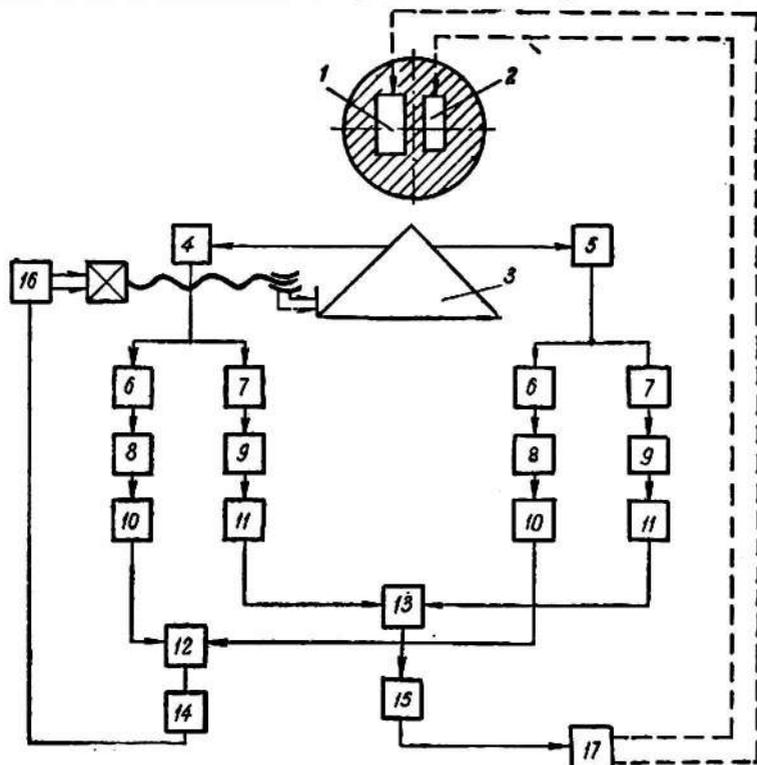


Рис. 6.

зуемся рис. 7. На рисунке показаны два светящихся изображения 1 и 2 и прямоугольная разделительная призма 3. Расстояние L между серединами изображений пропорционально измеряемому углу α . Призма перемещается (сканирует) вправо с равномерной скоростью $U_{ск}$, слева находится фотоприемник $\Phi\Pi_1$, справа — фотоприемник $\Phi\Pi_2$.

Интегральная чувствительность фотоприемника $\Phi\Pi_1$ — γ_1 , фотоприемника $\Phi\Pi_2$ — γ_2 . Размер одного изображения в направлении сканирования — b_1 , другого — b_2 . Положение призмы, когда ее делительное ребро совпадает с левой границей правого изображения, принято за начальное. Мгновенные значения фототоков в цепях фотоприемников под воздействием первого изображения

$$\begin{aligned} i_1 &= \gamma_1 F_{11}; \\ i_2 &= \gamma_2 F_{12}, \end{aligned} \quad (13)$$

где F_{11} — световой поток, пришедший на $\Phi\Pi_1$ от первого изображения;

F_{12} — световой поток, пришедший на $\Phi\Pi_2$ от первого изображения.

Световые потоки равны

$$\begin{aligned} F_{11} &= ES_1(x); \\ F_{12} &= ES_2(x), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\left. \begin{matrix} S_1(x) \\ S_2(x) \end{matrix} \right\}$ — переменные площади частей разделенного первого изображения;
 E — освещенность первого изображения, которую будем считать равномерной.

С учетом выражения (14) уравнения (13) будут иметь вид

$$\begin{aligned} i_1 &= \gamma_1 E S_1(x); \\ i_2 &= \gamma_2 E S_2(x). \end{aligned} \quad (15)$$

Площади $S_1(x)$, $S_2(x)$ выразятся как

$$\begin{aligned} S_1(x) &= hx \\ S_2(x) &= hb_1 - hx = h(b_1 - x), \end{aligned} \quad (16)$$

где h — высота изображения (см. рис. 6), а x изменяется в пределах

$$0 \leq x \leq b_1$$

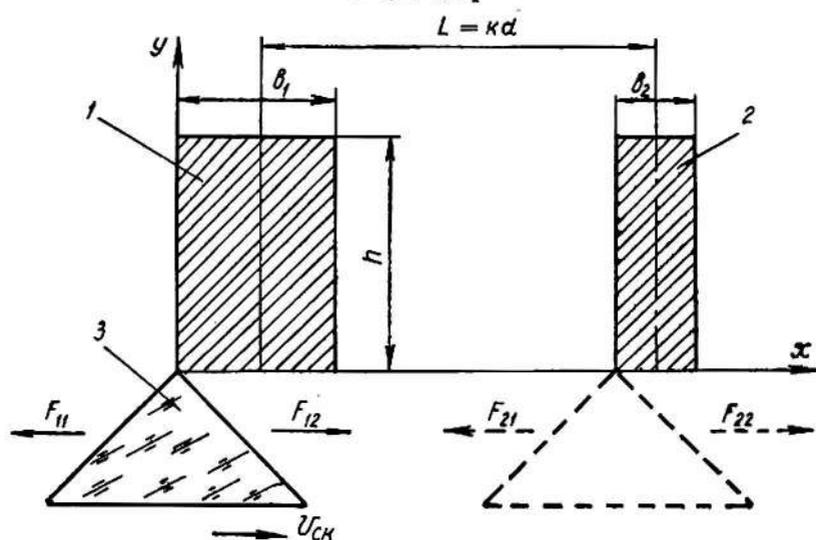


Рис. 7.

Приравняв с учетом формулы (16) выражения (15) друг к другу и решив полученное равенство относительно x , получим координату точки равенства мгновенных значений фототоков i_1 и i_2 , вызванных первым изображением. Обозначим эту координату x_1 , тогда

$$i_1 = i_2 = \gamma_1 E h x_1 = \gamma_2 E h (b_1 - x_1),$$

откуда

$$x_1 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} b_1. \quad (17)$$

Проделав то же самое со вторым изображением, получим, что

$$x_2 = L + \frac{b_1}{2} - \left(\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \right) \frac{b}{2}. \quad (18)$$

Расстояние $l_{\text{ном}}$ между точками равенства мгновенных значений фототоков для одного и другого изображений будет равно разности координат x_1 и x_2 , т. е.

$$l_{\text{ном}} = x_2 - x_1 = L + \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \left(\frac{b_1 - b_2}{2} \right). \quad (19)$$

Погрешность оценки (измерения) расстояния между серединами двух светящихся изображений или, что то же, погрешность совмещения изображений, обусловленная наличием двух фотоприемников в фотоэлектрическом устройстве, выразится равенством

$$\Delta L = l_{изм} - L = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(b_1 - b_2)}{2(\gamma_1 + \gamma_2)}, \quad (20)$$

Из формулы (20) видно, что погрешность ΔL равна нулю в двух случаях: когда $b_1 = b_2$ или когда $\gamma_1 = \gamma_2$. Сопоставив выражения (20) и (6),

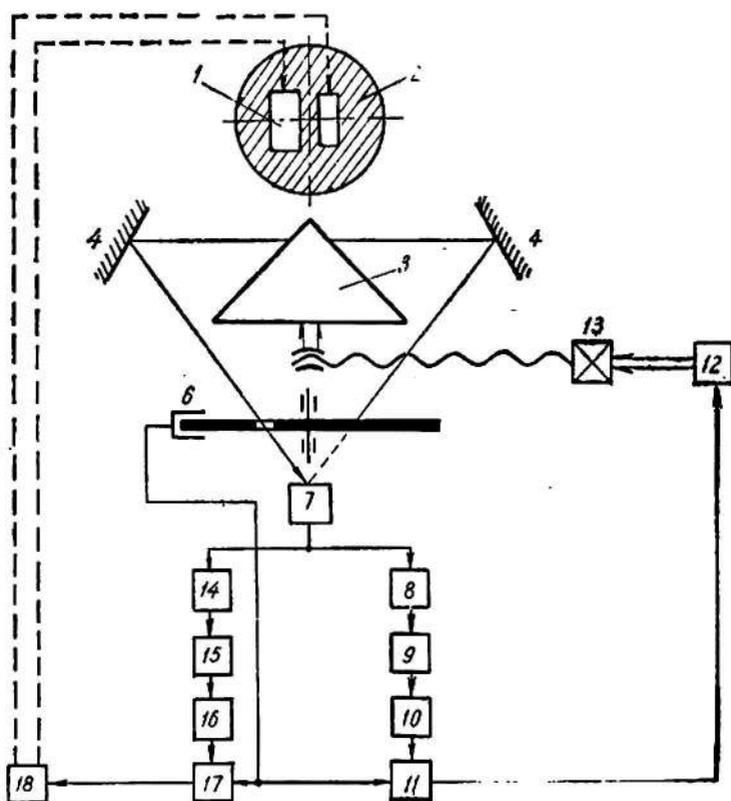


Рис. 8.

видим, что второй сомножитель выражения (20) представляет собой правую часть равенства (6), поэтому, обозначив его $\Delta L_{щ}$ (щ — щелевой), можно записать

$$\Delta L = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \Delta L_{щ}. \quad (21)$$

Первый сомножитель полученного уравнения всегда меньше единицы, поэтому при всех прочих равных условиях погрешность ΔL меньше погрешности $\Delta L_{щ}$.

Устранить погрешность ΔL позволяет схема с одним фотоприемником. Такая схема приведена на рис. 8. Имеются две взаимосвязанные фотоэлектрических следящих системы. Первая включает в себя призму 3, боковые отражающие зеркала 4, модулирующий диск 5 с генератором опорного напряжения 6, фотоприемник 7, фильтр частоты f_1 8, усилитель 9, детектор 10,

фазочувствительное устройство 11 и исполнительный двигатель 12, который через редуктор 13 связан с призмой 3. Вторая следящая система состоит из тех же элементов (3, 4, 5, 6, 7), что и первая, далее включает фильтр частоты f_2 14, усилитель 15, детектор 16 и фазочувствительное устройство 17, которое управляет работой двигателя 18, связанного с механизмами перемещения изображений 1 и 2. Таким образом, для первой следящей системы сигналом является световой поток изображения, модулированный частотой f_1 , для второй — световой поток изображения, модулированный частотой f_2 , а призма 3, модулирующий диск 5 с генератором опорного напряжения 6 и фотоприемник 7 у них общие.

Рассмотрим работу этих систем. Если измеряемый угол не равен нулю и призма 3 не делит изображение 1, световой поток которого модулирован частотой f_1 , на равные части, то световые потоки, отраженные от зеркал 4 и падающие на противоположные участки диска 5, не равны друг другу. Диск 5 модулирует эти световые потоки в противофазе частотой f_2 , во много раз меньшей частот f_1 и f_2 , поэтому в цепи фотоприемника 7 протекает переменный ток, у которого амплитуда составляющей частоты f_2 пропорциональна разности световых потоков разделенного изображения. Напряжение, снятое с фотоприемника, после фильтра 8, усилителя 9 и детектора 10 в фазочувствительном устройстве 11 сравнивается по фазе с опорным напряжением генератора 6. Полученный управляющий сигнал поступает на исполнительный двигатель 12, который через редуктор 13 перемещает призму 3 до тех пор, пока она разделит изображение на равные части. Направление вращения двигателя определяется соотношением фаз сигнала, снятого с фотоприемника, и сигнала генератора опорного напряжения.

Вторая система, для которой сигналом является световой поток изображения 2, модулированный частотой f_2 , работает аналогичным образом. Разница только в том, что управляющий сигнал с фазочувствительного устройства 17 подается на исполнительный двигатель 18, который перемещает изображения 1 и 2 до тех пор, пока они одновременно не разделятся призмой на равные части. Скорость отработки первой следящей системы должна быть больше скорости отработки второй следящей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Новиков, М. А. Пенязь. «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 4.
2. А. М. Дубиновский. «Оптико-механическая промышленность», 1965, № 2.
3. С. В. Елисеев. Труды ЦНИГАНК, вып. 43, 1961.