

**В. Ю. МЕЩЕРСКИЙ, А. В. НОВИКОВ**

(Киев)

## **ПУТИ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Рассматриваются основные разновидности фотоэлектрических измерительных систем, используемых для контроля широкого класса неэлектрических параметров.

Фотоэлектрические измерительные системы получили широкое распространение благодаря возможности их использования для контроля широкого класса неэлектрических характеристик и параметров бесконтактным методом.

По способу получения электрических величин, соответствующих измеряемым параметрам, известные в настоящее время фотоэлектрические измерительные системы целесообразно подразделить на два основных класса: фотометрические системы и фотоанализирующие системы [1—3].

Фотоэлектрические измерительные системы встречаются в четырех основных схемных вариантах.

1. Источником лучистой энергии является сам контролируемый объект, интенсивность или спектральный состав излучения которого воспринимается фотоэлектрическим преобразователем светового потока (ФЭП) и служит мерой контролируемого параметра. Примером таких систем являются фотоэлектрические пирометры.

2. Поток лучистой энергии от постороннего источника света направляется на ФЭП через контролируемый объект, в котором он частично поглощается в зависимости от величины контролируемого параметра (дымномеры, пылемеры, колориметры, газоанализаторы).

3. Поток лучистой энергии от постороннего источника света, направленный на ФЭП, частично перекрывается контролируемым объектом, причем степень экранирования, а следовательно, и воспринимаемая величина световой энергии определяются измеряемыми геометрическими характеристиками тела или его перемещением (измерение длин, толщин, площадей, деформаций, крутящих моментов и т. д.).

4. На ФЭП направляется поток лучистой энергии, отраженный от поверхности контролируемого объекта: при этом интенсивность света, падающего на ФЭП, характеризуется отражательной способностью поверхности объекта (определение чистоты обработки, гигроскопичности).

Для всех рассмотренных схем имеет место общая закономерность: наличие прямой зависимости измеряемого неэлектрического параметра от величины световой энергии, воспринимаемой ФЭП:

$$A = f_1(W),$$

где  $A$  — измеряемый параметр;  
 $W$  — световая энергия на ФЭП.

Обычно известная зависимость выходных электрических параметров ФЭП от входных световых характеристик  $[(u, i, r) = f_2(W)]$  позволяет получить результат фотоэлектрического измерения в виде сложной функции

$$A = f(u, i, r), \quad (1)$$

где  $(u, i, r)$  — обобщенный выходной параметр ФЭП.

По характеру использования входной информации фотометрические системы могут быть подразделены на непрерывные и релейные. Непрерывные фотометрические системы отличаются тем, что в них использование конкретного вида функции (1) осуществляется во всем исследуемом диапазоне изменения параметра  $A$ . В релейных фотометрических системах регистрируется определенное значение исследуемого параметра  $A$  внутри заданного диапазона, т. е. использование функциональной зависимости (1) осуществляется в одной точке.

В зависимости от способа определения результата измерения непрерывные фотометрические системы подразделяются на системы непосредственной оценки и системы сравнения.

Варианты непрерывных фотометрических систем непосредственной оценки представлены на рис. 1, а, б. В первой схеме индикаторное устройство ИУ градуируется с учетом зависимости (1) и должно обеспечивать возможность снятия отсчета во всем диапазоне изменения параметра  $A$ . Во втором случае требования к ИУ менее жесткие и заключаются в обеспечении возможности точной фиксации нулевого отсчета; достигается это введением оптического (ОК) или электрического (ЭК) компенсирующего устройства КУ. Отсчет снимается по отградуированной шкале регулятора величины компенсирующего воздействия.

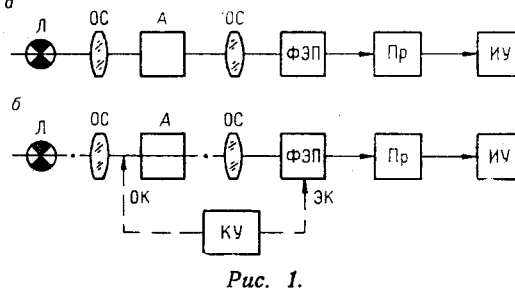


Рис. 1.

Основным недостатком систем непосредственной оценки является необходимость точной стабилизации характеристик ФЭП и источников света в процессе измерения в связи с наличием прямой зависимости между ними и показаниями ИУ при неизменном  $A$ .

Непрерывные фотометрические системы сравнения строятся по принципу сравнения двух световых потоков (известного и неизвестного), получаемых от одного источника светового потока. Градуировка величин регулирующего воздействия, создающего уравнивание эталонного потока с измеряемым, обеспечивает возможность фиксации результата измерения.

Индикаторное устройство функционирует лишь в зоне нуля (при работе в равновесном режиме). Такие системы бывают двух видов — с одновременным и поочередным сопоставлением двух сравниваемых

потоков. В первом варианте исключаются погрешности измерения, обусловленные непостоянством во времени характеристик источника светового потока, однако требуется обеспечение идентичности характеристик двух ФЭП. Во втором варианте благодаря модуляции световых потоков со сдвигами на  $180^\circ$  по фазе возможно сравнение потоков с помощью одного ФЭП, в связи с чем стабилизация его характеристик необязательна.

Релейные фотометрические системы находят широкое применение в автоматике и измерительной технике в качестве различных коммутирующих устройств. Они выполняются обычно в виде сочетания фотоэлектрических, электронных и электромеханических элементов и разделяются на схемы прямого действия, в которых функциональная зависимость (1) является прямо пропорциональной, и схемы обратного действия, в которых функциональная зависимость (1) обратно пропорциональна.

Фотоанализирующие системы возникли в результате развития и совершенствования оптических измерительных устройств.

Наиболее распространенной формой выражения измеряемого параметра в таких устройствах является линейное расстояние между некоторыми объектами (отсчетными индексами) в плоскости изображения: энергетические характеристики отсчетных индексов резко отличны от окружающего однородного фона (они либо темные на светлом фоне, либо светлые на темном). В ряде случаев, например, в прокатном производстве, визуальное снятие отсчета с оптического измерительного прибора затруднено специфическими условиями эксплуатации. Часто визуальный контроль не может быть использован в связи с требованием создания автоматически действующих измерительных комплексов. В соответствии с этим возникает задача преобразования первичной оптической информации в электрическую форму с целью возможности дистанционной ее передачи. Для осуществления указанного преобразования и используются фотоанализирующие измерительные системы, или системы фотоэлектрического анализа оптических изображений.

Вводя коэффициент  $M(A)$  первичного преобразования информации оптической частью измерительного устройства, представим измеряемый параметр в следующей промежуточной форме:

$$A \approx \frac{l}{M(A)}, \quad (2)$$

где  $l$  — линейное расстояние между отсчетными индексами оптического изображения.

Объектом вторичного преобразования является величина  $l$ , в связи с чем весьма существенным является вид функции  $M(A)$ . Обычно фотоанализирующие системы эффективно используются при  $\frac{l}{M(A)} = \text{const}$ , когда функция (2) является линейной. Это достигается, как будет показано ниже, соответствующим выбором диапазона контроля преобразующей системы.

В зависимости от способа анализа величины  $l$  оптического изображения фотоанализирующие измерительные системы могут быть разделены на системы обработки, системы кодирования и системы сканирования (системы развертывающего преобразования [4]).

Фотоанализирующие системы обработки могут применяться лишь для преобразования определенных изображений, когда отсчетный индекс один в поле зрения и задан либо ярким штрихом, либо границей «свет —

ть». В случае выражения индекса границей «свет — тень» дистанционное измерение производится путем диафрагмирования светлого участка изображения непрозрачной заслонкой до момента исчезновения сигнала на ФЭП [5]. Пример такой измерительной системы изображен на рис. 2, а.

Изображение горячей полосы П, ширина которой  $A$  контролируется с помощью оптической системы ОС, строится в плоскости диафрагмы Д с рабочим размером  $L$ , равным изображению максимально возможной ширины полосы. За диафрагмой расположен фотоэлектрический приемник лучистого потока ФЭП, а между ними помещается непрозрачная заслонка З в виде вращающегося диска, периферия которого выполнена по спирали Архимеда. Электрический сигнал с выхода ФЭП после усиления управляет работой двигателя М, вращающего заслонку до момента исчезновения выходного сигнала на ФЭП. Поскольку известно [6], что закон оптического преобразования в этом случае обеспечивает  $M(A) = M = \text{const}$ , а линейные смещения заслонки вдоль контролируемого размера диафрагмы пропорциональны углу поворота ее ( $l = K\alpha$ , где  $K = \text{const}$ ), то этот угол поворота, переданный дистанционно датчиком угла ДУ и зафиксированный приемным устройством ПУ, и определяет в некотором масштабе величину контролируемого параметра  $A$ :

$$A = \frac{l}{M} = \frac{K\alpha}{M} = K_0 \alpha,$$

где  $K_0 = \text{const}$  — масштаб преобразования.

Такие системы будем называть фотоанализирующими системами нулевой обработки.

Если отсчетный индекс преобразуемого изображения задается ярким штрихом, измерение может производиться при помощи слежения некоторым чувствительным элементом за положением штриха в поле зрения. Смещение чувствительного элемента следящей системы дистанционно фиксируется и характеризует параметр. Построенные таким

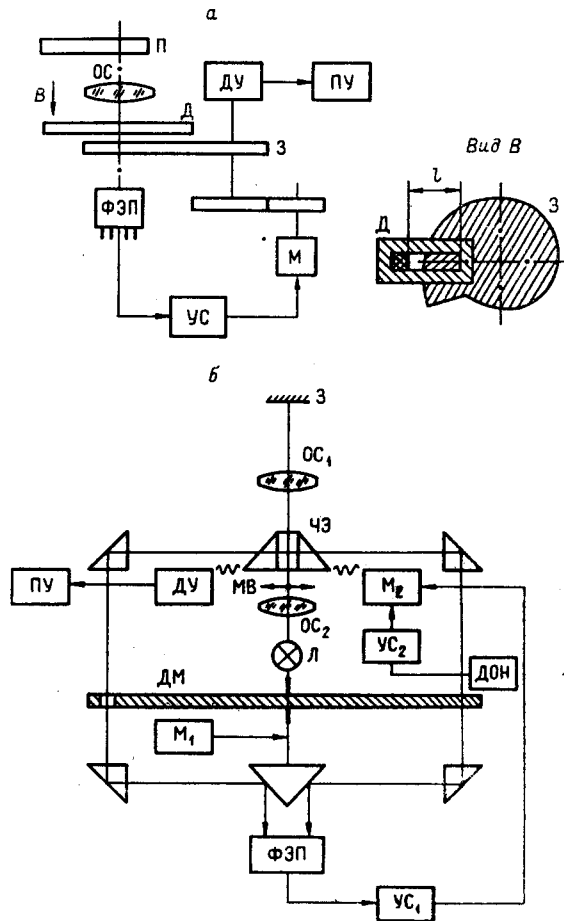


Рис. 2.

образом системы будем называть фотоанализирующими системами следящей отработки.

В качестве примера подобной системы рассмотрим представленную на рис. 2, б схему точного дистанционного измерения угла поворота некоторого вала в небольшом диапазоне. На контролируемом валу устанавливается отражающее зеркало З. Свет лампы Л с помощью оптических систем ОС<sub>1</sub> и ОС<sub>2</sub> через прозрачную фаску разделительной призмы (чувствительного элемента системы ЧЭ), находящуюся в плоскости изображения объектива ОС<sub>1</sub>, направляется в виде параллельного пучка на зеркало З. Если перпендикуляр к З совпадает с направлением центр фаски ЧЭ — центр ОС<sub>1</sub>, отраженный поток формируется объективом в виде прямолинейного яркого штриха на фаске ЧЭ, а на грани разделительной призмы, а следовательно, и на ФЭП не падает. В противном случае отраженный от зеркала световой поток попадает на одну из граней ЧЭ и с помощью преломляющих элементов на ФЭП.

Потоки в плечах ЧЭ модулируются в противофазе дисковым модулятором ДМ, вращаемым двигателем М<sub>1</sub>. Таким образом, в зависимости от отклонения перпендикуляра к З от заданного направления электрический сигнал на выходе ФЭП либо совпадает по фазе, либо сдвинут на 180° относительно электрического сигнала, вырабатываемого датчиком опорного напряжения ДОН при вращении ДМ.

Чувствительный элемент располагается на гайке высокоточной микрометрической пары и имеет возможность линейно перемещаться в плоскости изображения при вращении микрометрического винта МВ. Движение винта обеспечивается реверсивным двигателем М<sub>2</sub>, на обмотку управления которого подается сигнал с ФЭП, а на обмотку возбуждения — сигнал с ДОН. Следовательно, ЧЭ при наличии рассогласования в системе будет автоматически смещен в соответствующую сторону до попадания отраженного светового потока в прозрачную фаску (совмещение оси чувствительности системы с центром изображения индекса).

Линейные смещения  $l$  чувствительного элемента в определенном масштабе дистанционно фиксируется с помощью системы ДУ — ПУ. Однако в данном случае связь контролируемого параметра  $A = \varphi$  с линейным параметром  $l = K\alpha$  определяется следующей зависимостью:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{K \alpha}{f_{об}}, \quad (3)$$

где  $K = \text{const}$  — коэффициент, определяемый отношением шага винта к его полному обороту;

$\alpha$  — угол поворота ДУ;

$f_{об} = \text{const}$  — фокусное расстояние объектива ОС<sub>1</sub>.

Следовательно, в (3) имеем  $M(A) \neq \text{const}$ , и рассмотренное преобразование может быть осуществлено лишь в небольшом диапазоне углов, где практически  $M(A) = M = \text{const}$ .

Фотоанализирующие системы кодирования могут быть использованы лишь для преобразования оптического изображения с одним ярким прямолинейным отсчетным индексом, имеющим длину, достаточную для обеспечения необходимой точности. Они осуществляются путем расположения в плоскости изображения специальной диафрагмы в виде поразрядного сочетания прозрачных и непрозрачных участков, нанесенных по определенному коду. Фиксация результата измерения производится фотоэлектрическими преобразователями света, расположенными в каж-

дом разряде кодирования. Фотоанализирующие системы кодирования могут быть двух видов — с круговым [7] (кодовые фотоэлектрические диски) и прямолинейным [8] (кодирование изображения с параллельно смещающимся индексом) кодированием.

Наиболее универсальными системами преобразования оптических изображений независимо от количественных и качественных характеристик отсчетных индексов являются фотоанализирующие системы сканирования. Они осуществимы при обеспечении возможности последовательного анализа всех элементарных участков изображения в направлении исследуемой координаты.

Обычно для анализа изображения применяются механические сканирующие приспособления, позволяющие использовать в качестве приемников энергии высокочувствительные малогабаритные ФЭП.

По конструктивному исполнению механические сканаторы делятся на две группы — сканаторы с неподвижной анализирующей щелью и перемещением изображения и сканаторы с подвижной щелью и неподвижным изображением, в которых развертка последовательных участков изображения осуществляется путем непосредственного перемещения щели.

Фотоанализирующая измерительная система с механическим сканированием функционирует следующим образом. Измеряемый параметр  $A$  с помощью оптической схемы преобразовывается в линейный отрезок  $l$  в плоскости изображения. Сканатор при последовательном анализе изображения в определенные моменты фиксирует отсчетные индексы; при этом на выходе ФЭП фиксируются электрические импульсы. Следовательно, осуществляется преобразование

$$l = f(t), \quad (4)$$

где  $t$  — интервал времени между электрическими импульсами на выходе ФЭП.

В результате двойного преобразования, учитывая (2) и (4), получаем

$$A = \frac{f(t)}{M(A)}. \quad (5)$$

Окончательным результатом измерения при использовании фотоанализирующей системы сканирования является определение конкретного вида зависимости (5) в каждой точке диапазона измерения. По способу преобразования функции (5) к удобной для индикации форме фотоанализирующие системы сканирования можно разделить на следующие подгруппы: системы исключения сигнала рассогласования [3], системы время-импульсного преобразования [9, 10] и системы жесткой калибровки в процессе преобразования [11, 12]. В качестве примера построения фотоанализирующей системы сканирующего преобразования с исключением сигнала рассогласования рассмотрим схему дистанционного измерения угла поворота некоторого объекта в небольшом диапазоне (рис. 3). Пусть при нулевом положении контролируемого объекта (зеркала 1) изображение марки вспомогательного объекта 2 строится оптической системой 3 в центре поля, анализируемого с помощью сканатора 4 и ФЭП. При отклонениях зеркала отсчетный индекс изображения от марки 2 смещается относительно условного нулевого положения, зафиксированного неподвижным индексом. Вследствие расхождения индексов на входе функционального преобразователя 5 воз-

никает сигнал рассогласования, величина которого определяется временным интервалом между моментами сканирования отсчетных индексов. Этот сигнал может быть приведен к нулю либо поворотом самого объекта (в данном случае исключено), либо линейным смещением по оси  $X$  марки объекта 2. При помощи двигателя  $D$  с редуктором  $P$  осуществляется операция смещения марки до момента получения нулевого рассогласования. Измерив смещение  $L_x$  вспомогательного объекта 2, при известном законе  $L_x = \gamma(\varphi_B)$  определяем искомую величину угла поворота  $\varphi_B$  контролируемого объекта в виде

$$\varphi_B = \gamma_1(L_x). \quad (6)$$

Фотоанализирующие системы сканирующего время-импульсного преобразования требуют обеспечения специальных условий анализа, позволяющих представить функцию (4) как

$$l = K_0 t, \quad (7)$$

где  $K_0 = \text{const}$ .

Измерение в таких системах при условии  $M(A) = \text{const}$  сводится к фиксации отрезка времени  $t$  известными методами; для работы подобных систем необходима строго постоянная скорость сканирования изображения.

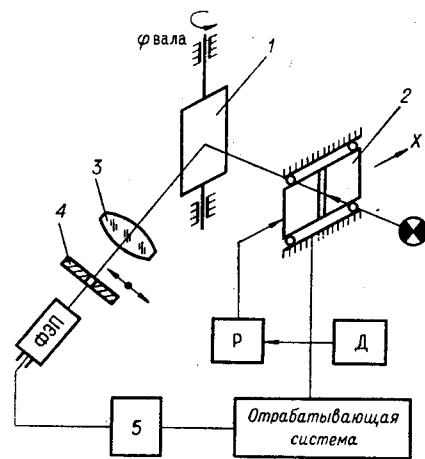


Рис. 3.

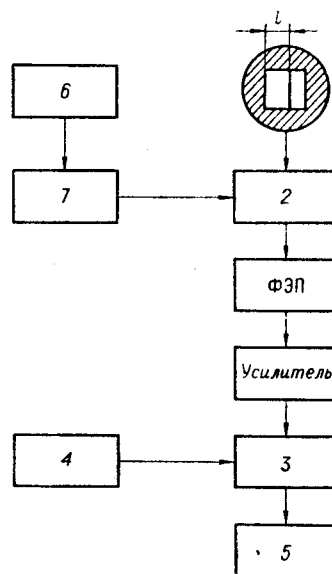


Рис. 4.

Блок-схема фотоанализирующей системы в таком исполнении представлена на рис. 4.

Анализ оптического изображения 1 производится сканатором с линейной разверткой 2 (диск со щелью по спирали Архимеда; барабан с винтовой щелью). При условии постоянства вращения сканатора, обеспечиваемого двигателем 6 с редуктором 7, справедлива форма преобразования (7).

Рабочие импульсы ФЭП усиливаются и управляют режимом электронного ключа 3, открывая его на время между их возникновением.

При открытом ключе на счетчик импульсов  $5$  проходят эталонные сигналы от источника сигналов стабильной частоты (кварцевого или мерцонного генератора)  $4$ , осуществляя преобразование  $t=na$ , где  $a$  — отрезок времени между единичными импульсами генератора  $4$ ;  $n$  — количество эталонных импульсов, прошедших за цикл сканирования через ключ. Окончательно имеем

$$l = K_0 t = K_0 a n = n \delta, \quad (8)$$

где  $\delta = K_0 a = \text{const}$  — единица младшего разряда индикаторного устройства.

При построении фотоанализирующих систем сканирующего преобразования с жесткой калибровкой анализирующее звено выполняется таким образом, чтобы скорость сканирования и скорость поступления информации в индикаторный элемент измерительного устройства подчинялись строго одинаковому закону. В этом случае функция (4) может быть представлена так:

$$l = f_1(t_1) + \dots + f_i(t_i) + \dots + f_n(t_n),$$

где

$$f_1(t_1) = f_i(t_i) = f_n(t_n) = l_i.$$

Таким образом, (4) является простой зависимостью вида

$$l = n l_i. \quad (9)$$

Результат измерения характеризуется числом  $n$  при масштабе калибровки  $l_i$ . Отличие такого преобразования от время-импульсного заключается в усложнении функций сканирующего элемента, который при своем движении вырабатывает сигналы для измерения отрезка времени между управляющими сигналами на ФЭП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Гринштейн. Фотоспротивления в приборах промышленной автоматики. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
2. В. И. Литвак. Фотоэлектрические приборы и регуляторы в машиностроении. М.—Киев, Машгиз, 1962.
3. В. Ю. Мещерский. Методы построения фотоэлектрических измерительных систем.—В сб. «Повышение точности и автоматизация измерительных систем». Киев, «Наукова думка», 1965.
4. Ф. Е. Темников. Теория развертывающих систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
5. Г. Х. Зарезанков. Фотоэлектронные приборы автоматического контроля размеров проката. М., Металлургиздат, 1962.
6. Б. Н. Бегунов. Геометрическая оптика. Изд-во МГУ, 1961.
7. И. В. Меськин. Фотоэлектрические преобразователи угловой величины в цифровой код. Л., Судпромгиз, 1962.
8. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
9. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Киев, «Техника», 1965.
10. А. В. Новиков. Некоторые вопросы проектирования автоматических устройств высокой точности для измерения угловых перемещений.—Оптико-механическая промышленность, 1962, № 12.



11. В. Ю. Мещерский. Измерение механических величин фотоэлектрическими методами с выдачей информации в дискретной форме.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.
12. А. В. Новиков. Устранение погрешности преобразователя «угол — код» вследствие нестабильности частоты генератора импульсов и скорости движения анализатора поля зрения.— Оптико-механическая промышленность, 1964, № 8.

*Поступила в редакцию  
4 апреля 1966 г.,  
окончательный вариант —  
12 июля 1966 г.*

---

**V. Yu. Meshcherskiy, A. V. Novikov**  
**WAYS OF DESIGNING**  
**THE PRECISION PHOTOELECTRIC MEASURING SYSTEMS**

The article concerns principal photoelectric measuring systems to measure various non-electrical quantities.

---