

32.96
п64

БИБЛИОТЕКА
ПО
АВТОМАТИКЕ



В.И. ЛИТВАК

ФОТОРЕЛЕ
В СИСТЕМАХ
АВТОМАТИКИ

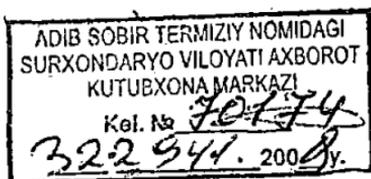
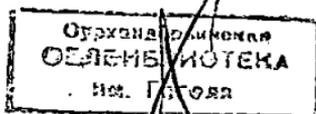


Выпуск 599

В. И. ЛИТВАК

ФОТОРЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

Второе издание, переработанное и дополненное



МОСКВА

«ЭНЕРГИЯ» 1979

ББК 32.96-04
Л 64
УДК 681.584.5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

И. В. Антик, Г. Г. Артамонов, А. А. Воронов, А. М. Закс,
В. К. Левин, В. С. Малов, В. Э. Низс, Д. А. Поспелов,
И. В. Прангишвили, Ф. Е. Темников, Ю. М. Черкасов,
А. С. Шаталов

Литвак В. И.

Л 64 Фотореле в системах автоматики. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1979. — 104 с. с ил. — (Б-ка по автоматике; Вып. 599).

40 к.

В книге рассматриваются вопросы проектирования и расчета фотореле. Приводятся принципиальные схемы фотореле, контролирующих различные механические, геометрические, теплотехнические и другие величины. Описываются конкретные примеры их использования в системах автоматического контроля, управления и защиты.

Первое издание книги вышло в 1961 г.

Книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами автоматизации производственных процессов в различных отраслях народного хозяйства.

Л 30306-344
051(01)-79 185-79 . 2302000000

ББК 32.96-04

6Ф6.5

ВИКТОР ИЗРАИЛЕВИЧ ЛИТВАК

ФОТОРЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

Редактор А. Х. Дубровский

Редактор издательства Т. В. Жукова

Обложка художника А. А. Иванова

Технический редактор В. В. Хапаева

Корректор Э. А. Филановская

ИБ № 1688

Сдано в набор 26.02.79

Подписано в печать 21.04.79

T-07263

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 2

Гарн. шрифта литературная

Печать высокая

Усл. печ. л. 5,46

Уч.-изд. л. 7,5

Тираж 15 000 экз.

Заказ 58

Цена 40 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10
Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

© Издательство «Энергия», 1979 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический прогресс характеризуется непрерывным расширением автоматизации процессов в промышленности, энергетике, сельском хозяйстве, на транспорте, в технике эксперимента.

В качестве средств автоматизации широкое применение находят фотоэлектрические приборы, отличающиеся простотой и надежностью конструкции, малыми габаритами и массой, высокой чувствительностью, быстродействием, экономичностью, отсутствием механической связи с контролируемым объектом.

Особое место среди устройств фотоэлектрической автоматики занимают фотореле. Без преувеличения можно утверждать, что нет таких производственных процессов, для контроля и регулирования которых нельзя было бы с успехом использовать фотореле.

В книге рассматриваются принципы построения фотореле и наиболее важные области их применения.

Настоящая книга является вторым, переработанным и дополненным изданием книги «Фотореле в системах автоматического контроля и регулирования», выпущенной в «Библиотеке по автоматике» в 1961 г.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СХЕМЫ ФОТОРЕЛЕ

Общие принципы построения, структура и классификация фотореле

Фотоэлектрическое реле (ФЭР) представляет собой устройство автоматического контроля или управления, чувствительным органом которого является фотоэлектронный прибор (фотоэлемент), реагирующий на изменение параметров электромагнитного излучения.

На рис. 1 представлена структурная схема ФЭР, состоящего в общем случае из фотоэлемента $\Phi П$, источника излучения $И$, оптической системы $ОС$, задающего $ЗУ$ и сравнивающего $СУ$

устройств, усилительно-преобразующего элемента $УПЭ$ и исполнительного органа $ИО$.

В ФЭР могут быть применены все известные типы фотоэлектронных приборов: вакуумные и газонаполненные фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоумножители, вентильные фотоэлементы, фотодиоды (в диодном

Рис. 1. Структурная схема фотореле.

и вентильном режимах), фототранзисторы (униполярные и биполярные), фототиристоры, координатные фотоэлементы (фотопотенциометры, фотодиоды на основе продольного и поперечного фотоэффектов и др.). Выбор типа фотоэлемента в каждом конкретном случае определяется условиями эксплуатации ФЭР, его чувствительностью и стабильностью, интенсивностью, спектральным составом используемого излучения и другими факторами.

Источник излучения предназначен для создания потока электромагнитной энергии, на параметры которого воздействует контролируемый объект. При этом возможно выполнение ФЭР, реагирующих на:

лучистый поток и, в частности, на появление или исчезновение луча от источника;

- облученную чувствительную поверхность фотоэлемента;
- количество облучения;
- координату облученного участка чувствительной поверхности фотоэлемента;
- спектральный состав излучения;
- частоту или фазу импульсов лучистой энергии.

В ФЭР может использоваться излучение в инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой областях спектра, рентгеновское, α -, β - и γ -излучение. В качестве источников излучения применяются лампы накаливания, газоразрядные приборы, электролюминофоры, светодиоды, электронно-лучевые приборы, оптические квантовые генераторы, рентгеновские трубки, радиоактивные изотопы. В отдельных случаях источником энергии служит сам контролируемый объект (нагретое тело, люминофор и т. п.).

Управляемые источники света, например электролюминесцентные конденсаторы и светодиоды, в ряде фотоэлектрических устройств выполняются в одном корпусе с фотоэлементами (фоторезисторами, фотодиодами фототранзисторами, фототиристорами) и могут иметь с ними не только оптическую, но и электрическую связь (подобные элементы называют оптронами) [59].

Оптическая система служит для перераспределения в пространстве лучистого потока с целью создания условий эффективного воздействия контролируемого объекта на параметры этого потока.

При помощи задающего устройства ФЭР настраивается на заданную контролируемую величину, при которой оно должно сработать. Уровень срабатывания ФЭР может быть постоянным или меняющимся по определенному закону (программе). В качестве задающих устройств используются переменные резисторы в цепи фотоэлемента или усилителя фототока, светофильтры, устанавливаемые перед фотоэлементом, приспособления для установки положения фотоэлемента и источника излучения и т. д. Уровень срабатывания ФЭР устанавливается вручную или автоматически по сигналам программного устройства.

В сравниваемом устройстве текущее значение контролируемого параметра сопоставляется с заданным уровнем срабатывания ФЭР и формируется сигнал, параметры которого определяются соотношением сравниваемых величин.

Сигнал с выхода сравнивающего устройства поступает в усилительно-преобразующий элемент, в котором в зависимости от необходимости осуществляются усиление и преобразование сигнала, обеспечивающие передачу его на расстояние и воздействие на исполнительный орган, стабилизацию отдельных параметров, ввод поправок, решение математических и логических задач, запоминание обнаруженных признаков событий и т. п. В ФЭР нашли применение электромеханические (на электромагнитных, магнитоэлектрических, магнитоуправляемых реле), электронно-ламповые, тиратронные, транзисторные, тиристорные, магнитные усилители постоянного и переменного тока. Выбор типа усилителя обусловлен требованиями к его входному и выходному сопротивлениям, коэффициенту усиления по мощности, характеристикам источника питания, а также к габаритам и сроку службы.

Исполнительные органы ФЭР воздействуют на командные (включающие, переключающие, отключающие, регулирующие и т. п.), анализирующие, индикаторные устройства систем контроля и управления. В качестве исполнительных органов используются электромеханические и электронные реле, контакторы и магнитные пускатели, электромагниты, электродвигатели и др.

Фотоэлектрические реле могут быть классифицированы по ряду признаков, наиболее существенными из которых являются следующие:

1. Тип используемого фотоэлемента.

2. Характер излучения, на которое реагирует ФЭР.

3. Воздействие, необходимое для срабатывания ФЭР: появление или исчезновение излучения, увеличение или уменьшение его интенсивности, смещение спектра излучения, изменение частоты импульсов излучения и др.

4. Метод контроля исследуемого параметра: ФЭР с прямым (непосредственным) преобразованием, реагирующие на абсолютное изменение параметра; ФЭР с прямым преобразованием, реагирующие на заданное относительное изменение параметра, сравниваемого с эталонным или иным его значением (дифференциальные ФЭР); ФЭР с уравновешивающим преобразованием (компенсационные ФЭР).

5. Число воспринимаемых лучистых потоков: одноканальные и двухканальные ФЭР.

6. Физическая природа входного воздействия: ФЭР положений, перемещений, скоростей, ускорений, напряжений, деформаций, сил, давлений, уровней, расходов, концентраций, цвета и пр.

Характеристики фотореле и требования, предъявляемые к ним

К основным характеристикам ФЭР относятся статические и динамические характеристики, чувствительность, инерционность, параметры срабатывания и отпускания, точность срабатывания, стабильность характеристик, способность к перегрузкам, надежность.

Статическая характеристика выражает связь между входной x и выходной y величинами в установившемся режиме и задается аналитически в виде уравнения $y=f(x)$ или графически. Входной величиной ФЭР является контролируемая физическая величина или параметр лучистого потока, на который она воздействует, а выходной — сигнал на выходе исполнительного органа.

Статическая характеристика ФЭР имеет релейный характер, т. е. непрерывному изменению входной величины соответствует скачкообразное изменение выходной величины, которая может принимать конечное число значений (обычно 2 или 3). Значение $x=x_{\text{сраб}}$, при котором y скачком изменяется до $U_{\text{макс}}$, соответствующего включению исполнительного органа, называется параметром срабатывания, или порогом чувствительности, а значение $x=x_{\text{отп}}$, при котором y скачком уменьшается до $U_{\text{мин}}$, соответствующего отключению исполнительного органа, называется *параметром отпускания*.

Статическая характеристика приобретает релейный характер при использовании хотя бы одного составного элемента с релейными свойствами. Такими элементами в ФЭР могут быть фотоэлементы (фототиристоры, лавинные фотодиоды), схемы сравнения, пороговые усилительно-преобразовательные звенья, например схемы, использующие нелинейность характеристик тиратронов, тиристоров, стабилитронов, диносторов, триггеры, диодные, транзисторные, оптоэлектронные ключи, автогенераторные реле и др., исполнительные органы позиционного действия.

Во многих случаях для ФЭР удобно использовать понятие *чувствительности*, которая определяется производной фототока или соответствующего параметра потока лучистой энергии по контролируемой величине.

Динамическая характеристика определяет поведение ФЭР при изменении контролируемой величины. Ее удобно представлять в виде зависимости выходной величины от времени t при подаче на вход некоторых типовых воздействий, например, ступенчатой, импульсной функции или функции, возрастающей по линейному закону. Функция $y=f(t)$ зависит от характера протекающих процессов и может быть аperiodической, колебательной, ступенчатой с запаздыванием и др.

Инерционность (быстродействие) ФЭР характеризуется временем срабатывания $t_{\text{ср.аб}}$, равным интервалу времени от момента подачи на вход величины $x \geq x_{\text{ср.аб}}$ до момента установления выходной величины $y_{\text{макс}}$, или максимальной частотой срабатывания: $f_{\text{макс}}=1/(t_{\text{ср.аб}}+t_{\text{отл}})$, где $t_{\text{отл}}$ — время отпущения.

Точность срабатывания ФЭР измеряется разностью между истинным и заданным значениями параметров срабатывания и зависит от погрешностей, обусловленных конструкцией ФЭР, качеством изготовления его элементов и условиями эксплуатации. Погрешности, вызванные конструктивными недостатками и некачественностью изготовления, относятся к основным погрешностям и могут быть учтены при градуировке задающего устройства. Погрешности, связанные с условиями эксплуатации, обусловлены тем, что функция каждого из преобразований цепочки $x \rightarrow y$ зависит не только от контролируемой величины x , но и от ряда дополнительных факторов: непостоянства напряжения питания элементов; изменений температуры и влажности окружающей среды, влияющих на чувствительность некоторых типов фотоэлементов; подсветки фотоэлементов посторонними источниками света; нестабильности параметров элементов, обусловленной усталостью и старением, нестационарности внешних электрических и магнитных полей и др. Чувствительность каждого из элементов к дополнительным факторам является причиной дополнительных погрешностей (возникающих при изменении этих факторов относительно их значений при градуировке) и нестабильности работы ФЭР.

В отличие от основных погрешностей, являющихся систематическими, дополнительные погрешности относятся к случайным и не могут быть учтены при градуировке.

Стабильность характеристик ФЭР во времени и при изменении условий работы определяется временными, температурными и другими интервалами, в которых эти характеристики не выходят за допустимые пределы.

Перегрузочная способность характеризуется максимальным значением контролируемой величины и временем ее действия, при котором ФЭР не выходит из строя.

Надежность ФЭР, являющихся системами многократного действия (т. е. системами, предназначенными для длительной работы с восстановлением после каждого отказа и с профилактическим обслуживанием), определяется следующими показателями [40]: вероятностью безотказной работы $P(t)$ в течение заданного времени непрерывной работы; средней наработкой на отказ T_n ; средней интенсивностью отказов Λ в заданном временном интервале; средним временем восстановления системы T_v , затрачиваемым на одну неисправность.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы, характерном для многих электронных и электромеханических систем, $P(t)=\exp(-\Lambda t)$; $\Lambda=1/T_n=\text{const}$.

В зависимости от конкретных условий применения к ФЭР могут предъявляться следующие требования:

- высокая чувствительность к контролируемому параметру;
- высокое быстродействие;
- минимальное влияние на характеристики утомляемости и старения элементов, а также внешних факторов;
- минимальное обратное влияние на контролируемый объект;
- повторимость характеристик, обеспечивающая возможность замены вышедших из строя элементов без существенной перенастройки и без снижения точности срабатывания ФЭР;
- надежность;
- возможность использования стандартных и унифицированных составных элементов, технологичность конструкции, удобство и простота монтажа, настройки и обслуживания.

Фотореле на фотоэлементах с внешним фотоэффектом и фотоумножителях

На базе фотоэлементов с внешним фотоэффектом и фотоумножителей можно создавать ФЭР с высоким быстродействием, стабильными характеристиками, обеспечиваемыми, в частности, отсутствием заметной зависимости фототока от температуры в широком диапазоне и низким порогом чувствительности, обусловленным малыми темновыми токами.

Ток фотоэлементов с внешним фотоэффектом составляет десятки микроампер, а фотоумножителей — десятые доли и единицы миллиампер; поэтому в ФЭР на таких фотоэлементах, как правило, используются усилители фототока. С фотоэлементами с внешним фотоэффектом и фотоумножителями хорошо согласуются электронно-ламповые усилители, отличающиеся высоким входным сопротивлением, низким уровнем шумов, большим усилением, стабильностью параметров.

На рис. 2,а показана схема ФЭР на фотоэлементе с внешним фотоэффектом Φ и с усилителем на электронной лампе (триоде) L с отдельным питанием анодных и сеточных цепей от источников постоянного тока. При затемненном фотоэлементе триод заперт отрицательным сеточным смещением $U_{см}$ и исполнительное электро-механическое реле P в анодной цепи триода выключено. При освещении фотоэлемента фототок на резисторе R_c создает напряжение, уменьшающее смещение $U_{см}$, и через триод начинает протекать ток, вызывающий срабатывание исполнительного реле P . Если поменять местами фотоэлемент Φ и резистор R_c , то ФЭР будет срабатывать при затемнении фотоэлемента. Пороговое значение освещенности, при котором должно срабатывать ФЭР, устанавливается резистором R_1 , регулирующим смещение $U_{см}$.

Для уменьшения нулевого тока ФЭР усилительную лампу можно включить в схему моста, который балансируется при определенной освещенности фотоэлемента. При достижении уровня освещенности, заданного настройкой смещения, изменение внутреннего сопротивления лампы, вызванное изменением фототока, приводит к нарушению баланса моста и срабатыванию реле в его диагонали. При использовании поляризованного реле в качестве исполнительного ФЭР может реагировать не только на величину, но и на знак изменения освещенности фотоэлемента.

В ФЭР на рис. 2,б в отличие от ФЭР на рис. 2,а используется один источник питания. Запирающее сеточное смещение здесь подается от включенного в цепь катода лампы L резистора R_1 . Однако из-за отрицательной обратной связи, обусловленной протеканием анодного тока по резистору R_1 , такое ФЭР имеет пониженную чувствительность.

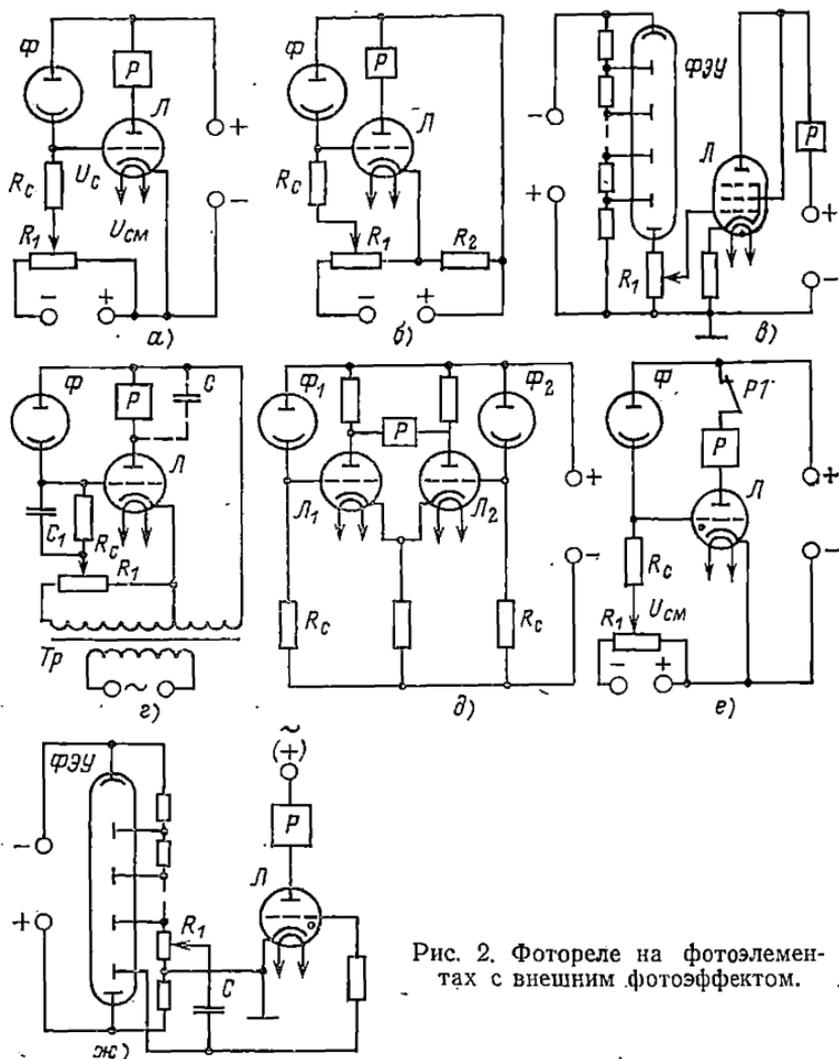


Рис. 2. Фотореле на фотоэлементах с внешним фотоэффектом.

На рис. 2,в представлена схема высокочувствительного ФЭР на фотоумножителе ФЭУ.

При питании ФЭР от сети переменного тока в схему вводится выпрямитель или используется свойство односторонней проводимости усилительных ламп и фотоэлементов, как в ФЭР на рис. 2,г. Здесь в течение отрицательных полупериодов напряжения питания

через лампу и фотоэлемент ток протекает независимо от освещенности фотоэлемента, а во время положительных полупериодов имеют место те же процессы, что и на рис. 2,а, в, но ток через лампу L и обмотку реле P в данном случае пульсирует с частотой питающей сети. Для исключения дребезга реле параллельно его обмотке включают конденсатор, сглаживающий пульсации, либо используют реле со временем отгласкивания, большим периода колебаний питающего напряжения.

В ФЭР на рис. 2,а—г применены усилители постоянного тока, недостатком которых является дрейф нуля. В связи с этим предпочтительнее использовать усилители переменного тока, в которых отсутствует дрейф нуля. Кроме того, в усилителях переменного тока обеспечиваются помехоустойчивость и весьма низкий порог чувствительности, так как переменный полезный сигнал простыми средствами отделяется от медленно меняющихся сигналов, вызванных изменениями параметров усилителя, источника питания и внешних условий, даже в случаях, когда уровень шумов превышает амплитуду полезного сигнала.

При использовании усилителей переменного тока в ФЭР часто постоянные или медленно меняющиеся сигналы преобразуют в переменные путем модуляции потока лучистой энергии или фототока механическими, электрическими, магнитными методами. В качестве механических модуляторов светового потока применяются вращающиеся с постоянной скоростью непрозрачные диски с отверстиями, поляризационные фильтры, качающиеся зеркала. Распространенными методами электрической и оптической модуляции являются использование модулированных источников света, вибропреобразователей, электрооптических и магнитооптических модуляторов, питание фотоэлементов переменным током, магнитная модуляция фототока непосредственно в фотоэлементах и др.

В ФЭР для модулированного светового потока в цепь сетки усилительной лампы вводится конденсатор, не пропускающий постоянной и медленно меняющейся составляющих фототока.

На рис. 2,д показана схема дифференциального ФЭР. Сравнимые световые потоки воспринимаются в нем двумя фотоэлементами.

В ФЭР на фотоэлементах с внешним фотоэффектом наряду с электронно-ламповыми усилителями получили применение и тиратронные усилители, обеспечивающие большое усиление в одном каскаде и позволяющие управлять значительными мощностями. Однако из-за высокого порога чувствительности таких усилителей ФЭР, в которых они применяются, пригодны лишь для контроля сравнительно больших лучистых потоков.

На рис. 2,е представлена схема ФЭР с тиратронным усилителем, питаемого постоянным током и реагирующего лишь на однократные изменения лучистого потока. Когда фотоэлемент Φ освещен, фототок создает на резисторе R_0 напряжение, которое компенсирует отрицательное сеточное смещение, снимаемое с потенциометра R . При этом происходит зажигание тиратрона и в его анодной цепи начинает протекать ток, достаточный для срабатывания реле P . Для подготовки ФЭР к действию следующего светового импульса необходимо восстановить управляющие свойства сетки, т. е. прекратить разряд в тиратроне. С этой целью последовательно с обмоткой реле P обычно включают размыкающие контакты этого же реле, разрывающие цепь анодного питания тиратрона через некоторое время после срабатывания ФЭР.

Для контроля непрерывно меняющихся лучистых потоков применяются ФЭР с тиратронными усилителями, питаемыми от источников переменного тока. В таких схемах сетка тиратрона восстанавливает свои управляющие свойства в каждый отрицательный полупериод напряжения, питающего анодные цепи.

Условия срабатывания ФЭР на рис. 2,ж в отличие от рис. 2,а—е определяются не значением лучистого потока в данный момент времени, а количеством облучения, воспринятым фотоэлектронным прибором (фотоумножителем ФЭУ) за некоторый промежуток времени. Интегрирующим элементом здесь служит накопительный конденсатор C . Если фотоумножитель освещен, то фототок заряжает конденсатор. По мере заряда напряжение на конденсаторе увеличивается, приобретая через промежуток времени, зависящий от освещенности, значение напряжения зажигания тиратрона U . При зажигании тиратрона срабатывает реле P . Пороговая величина количества облучения определяется емкостью конденсатора C и сопротивлением резистора R_1 .

Недостатками ФЭР на фотоэлементах с внешним фотоэффектом являются громоздкость, необходимость в высоковольтных источниках питания и усилителях с большими коэффициентами усиления, пониженная устойчивость к механическим воздействиям, низкая надежность, обусловленная, в частности, малым сроком службы фотоэлементов и усилительных ламп.

Фотореле на фоторезисторах

По сравнению с фотоэлементами с внешним фотоэффектом фоторезисторы обладают следующими достоинствами, обусловившими их широкое применение в ФЭР: пониженное напряжение питания, значительно большая интегральная чувствительность, возможность работы в более широком спектральном диапазоне, большие значения допустимых фототоков, стабильность характеристик во времени, меньшие габариты и масса, простота конструкции, устойчивость к механическим воздействиям и большой срок службы.

К недостаткам фоторезисторов следует отнести повышенную инерционность, значительную зависимость характеристик от температуры. Однако для многих случаев использования фоторезисторов в ФЭР эти недостатки принципиального значения не имеют.

Сравнительно большая мощность рассеивания фоторезисторов позволяет использовать их для непосредственного управления (без предварительного усиления) исполнительными органами мощностью до нескольких ватт. Исполнительное реле включается последовательно с фоторезистором ΦP (ФЭР на рис. 3,а срабатывают при засветке) или параллельно ему. Для регулировки чувствительности ФЭР при установке уровня срабатывания, компенсации разброса параметров фоторезистора и замене исполнительного реле последовательно с фоторезистором вводится резистор (R на рис. 3,а). Для уменьшения явления гистерезиса статической характеристики ФЭР последовательно с резистором R может быть включен дополнительный резистор, шунтируемый размыкающим контактом реле P (аналогичный метод применим и в других описываемых схемах ФЭР).

Фоторезисторы одинаково проводят ток в обоих направлениях, и ФЭР на рис. 3,а может питаться переменным током, если в качестве исполнительного применить реле переменного тока.

В дифференциальном ФЭР (рис. 3,б) ток в диагонали моста, протекающий через обмотку исполнительного реле P , зависит от соотношения потоков, воспринимаемых фоторезисторами ΦP_1 и ΦP_2 . В такой схеме может быть исключено влияние лучистого потока фона, а также темновых токов на условия срабатывания ФЭР.

Для увеличения мощности исполнительных реле в ФЭР по схемам, подобным приведенным на рис. 3,а, б, необходимо увеличивать фототок. С этой целью может быть увеличена рабочая (светочувствительная) поверхность фоторезистора, однако при этом увеличивается его инерционность, уменьшается стабильность и снижается эффективность управления узким лучом. Увеличение фототока за счет повышения уровня засветки снижает чувствительность и стабильность фоторезисторов, усложняет конструкцию осветителя.

Существенное увеличение фототока достигается при импульсном режиме работы фоторезистора. Так, в ФЭР на рис. 3,в обеспечивается импульсное включение исполнительного реле с током срабатывания до 1А при использовании фоторезисторов типов -ФСК, ФСК-М и подобных им [58]. Конденсатор C через выпрямитель D заряжается до напряжения вторичной обмотки повышающего трансформатора Tr , составляющего 1,5—2 кВ. При освещении сопротивление фоторезистора резко падает и в обмотке реле импульсно увеличивается ток в результате разряда на нее конденсатора C .

При введении промежуточных усилителей существенно повышается чувствительность ФЭР, обеспечивается возможность введения элементов температурной и частотной коррекции, упрощается согласование исполнительных органов с фоторезисторами.

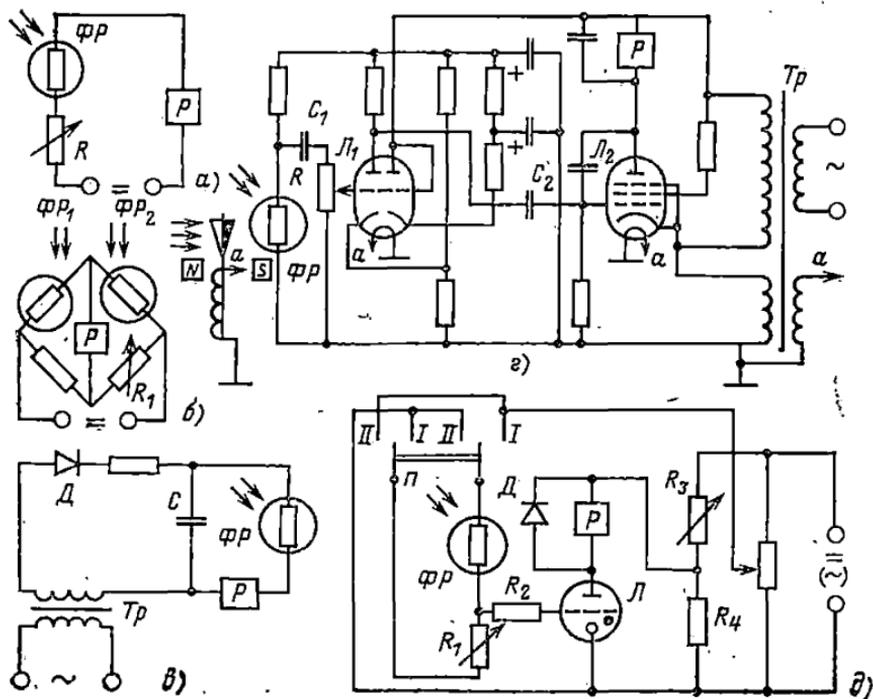
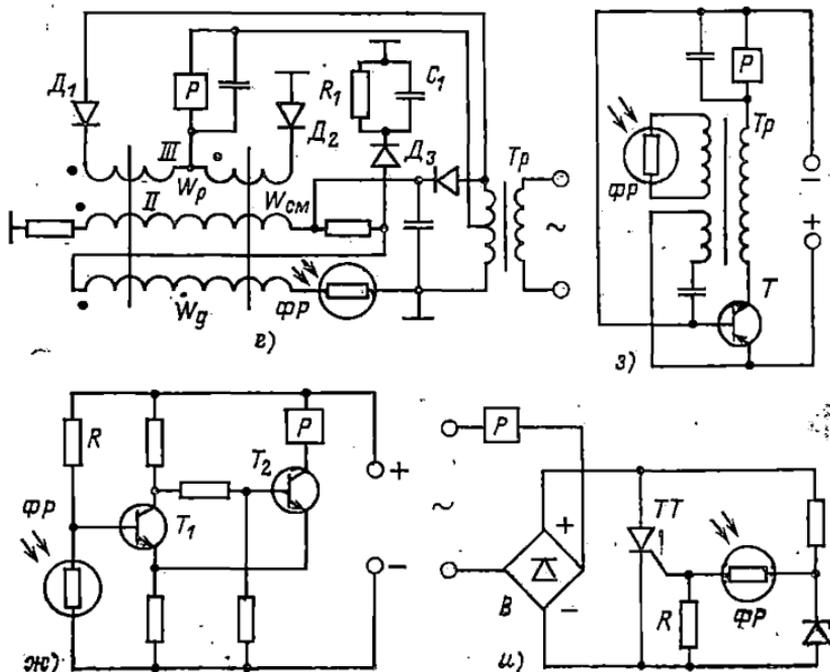


Рис. 3. Фотореле

Высокоомные фоторезисторы хорошо согласуются с электронно-ламповыми усилителями. На рис. 3,а представлена схема ФЭР типа ФРС-15 с таким усилителем, реагирующего на модулированный световой поток. Модулятором служит электромагнитный вибратор Эв с заслонкой, прерывающей световой поток с частотой 50 Гц. Переменная составляющая фототока, возникающая при освещении фоторезистора, усиливается в усилителе на лампах L_1 и L_2 и включает исполнительное реле P . Чувствительность ФЭР регулируется резистором R .

В ФЭР с фоторезисторами возможно применение тиратронов с холодным катодом, имеющих высокое входное сопротивление (десятки мегаом), большой коэффициент усиления по мощности (порядка 10^4-10^5), высокую крутизну характеристики зажигания, высокую экономичность, малые габариты, большой срок службы. На рис. 3,б показана схема ФЭР, использующего тиратрон с холодным катодом L (типа МТХ-90). Фоторезистор ΦP , образующий с резистором R_1 делитель напряжения, через ограничительный резистор R_2 включен в цепь управляющего электрода тиратрона. При освещении (если переключатель Π установлен в положение I) или при затенении фоторезистора (если переключатель Π установлен в положение II), когда напряжение на управляющем электроде достигает напряжения зажигания, тиратрон зажигается и включает исполнительное реле P . Диод D служит для разрядки индуктивности обмотки реле P в моменты погасания тиратрона. Резистор R_1 , который может включать в себя элементы температурной и частотной компенсации, вместе с резисторами R_3 и R_4 установки чувстви-



на фоторезисторах.

тельность фоторезистора и тиратрона используется для настройки режима работы ФЭР.

В ФЭР на фоторезисторах находят применение также и магнитные усилители, отличающиеся сравнительно низким входным сопротивлением (до нескольких килоом), но обладающие такими достоинствами, как высокие стабильность и надежность, вибростойкость, высокий к. п. д., низкий порог чувствительности (10^{-16} — 10^{-14} Вт), значительные коэффициенты усиления, большой срок службы, готовность к работе сразу после включения питания.

На рис. 3,е приведена схема ФЭР, в котором использован магнитный усилитель. В цепь управляющей обмотки I усилителя включен фоторезистор ΦP , засветка которого приводит к росту тока подмагничивания и увеличению тока в рабочей (выходной) обмотке III , обеспечивающему срабатывание исполнительного реле P . Параметры обмотки смещения II выбраны из условия получения минимального тока холостого хода усилителя. Благодаря введению диодов D_1 и D_2 в обмотке III протекает пульсирующий ток, постоянная составляющая которого оказывает подмагничивающее действие. Форсирующая цепочка из резистора R_1 , конденсатора C_1 и диода D_3 увеличивает быстродействие ФЭР при отключении (время срабатывания и отпущения ФЭР составляет 0,04—0,06 с).

Рядом преимуществ обладают ФЭР с транзисторными и тиристорными усилителями, отличающимися малыми габаритами, надежностью, простотой схемы, возможностью питания от низковольтных источников [21, 25, 68].

Простое ФЭР может быть получено при включении фоторезистора в цепь базы транзистора. При освещении фоторезистора его сопротивление уменьшается и ток в цепи коллектора увеличивается, вызывая срабатывание реле в этой цепи.

Для повышения чувствительности ФЭР при низких уровнях освещенности необходимо согласовать темновое сопротивление фоторезистора с входными параметрами усилителя, и с этой целью следует применять многокаскадные транзисторные схемы, в которых приняты меры для повышения входного сопротивления [17, 41].

Повышение быстродействия и надежности ФЭР достигается при использовании усилителей, работающих в релейном режиме. Так, в ФЭР на рис. 3,ж для усиления фототока применен несимметричный транзисторный триггер с эмиттерной связью (триггер Шмитта) [87]. При определенном уровне освещенности, задаваемом резистором R , триггер из исходного устойчивого состояния, при котором транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 закрыт, скачкообразно переходит во второе состояние, при котором транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 закрыт и срабатывает реле P .

В ФЭР на рис. 3,з применен автоколебательный усилитель с релейной характеристикой в виде блокинг-генератора на транзисторе [69]. При засветке фоторезистора генератор скачкообразно переходит из автоколебательного режима в заторможенный, транзистор T отпирается и срабатывает исполнительное реле P .

Большое усиление по мощности и повышенную надежность при управлении значительными мощностями позволяют получать ФЭР с тиристорными усилителями. Схема одного из таких ФЭР показана на рис. 3,и [2]. Фоторезистор ΦP с резистором R образует делитель, который питается стабилизированным напряжением. При освещении фоторезистора тиристор TT открывается. Так как при этом ладные напряжения на выпрямителе B и открытом тиристоре мало, то практически все напряжение питающей сети прикладывается

к исполнительному органу P (например, реле или двигателю). При затемнении фоторезистора ток в цепи управляющего электрода тиристора становится малым, и при очередном падении до нуля анодного напряжения тиристор закрывается, а ток в цепи питания исполнительного органа P становится меньшим рабочего значения.

Фотореле на фотодиодах

Обладея, как и фоторезисторы, большой чувствительностью, низкими рабочими напряжениями, малыми габаритами и массой, механической прочностью и долговечностью, фотодиоды превосходят их по быстродействию и температурным характеристикам.

Фотодиоды могут включаться в устройства как с внешним источником питания (фотодиодный режим), так и без него (вентильный, или фотогальванический, режим). В вентильном режиме в отличие от фотодиодного отсутствуют темновые токи, что является преимуществом этого режима, весьма существенным при контроле малых лучистых потоков.

На базе фотодиодов в вентильном режиме можно создавать простейшие по схеме и достаточно чувствительные ФЭР. При управлении слаботочными цепями в таких ФЭР отпадает необходимость в источниках питания (рис. 4,а)¹.

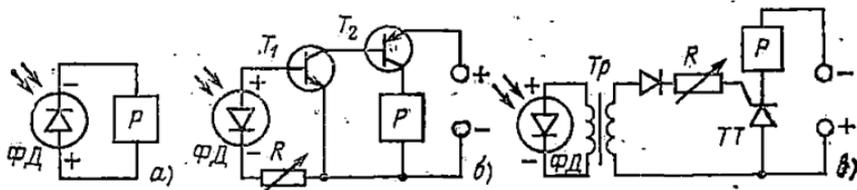


Рис. 4. Фотореле на фотодиодах в вентильном режиме.

Допустимая мощность коммутируемых цепей и чувствительность ФЭР повышаются при использовании усилителей фототоков. Так, с этой целью в ФЭР на рис. 4,б применен транзисторный усилитель постоянного тока, а в ФЭР на рис. 4,в, предназначенном для контроля модулированных потоков, — усилитель в виде тиристорного ключа.

Инерционность фотодиодов в вентильном режиме значительно больше, чем в фотодиодном, и поэтому последний чаще используется в ФЭР, особенно в случаях, когда допустимо наличие темнового тока (рис. 5).

Фотодиоды в диодном режиме, так же как и в вентильном, позволяют создавать ФЭР без усилителей фототоков (рис. 5,а) [28].

В ФЭР на фотодиодах возможно применение электронно-ламповых и тиратронных усилителей. Схемы таких ФЭР подобны показанным на рис. 2,а, б, г — е и на рис. 3,в.

¹ Подобные ФЭР могут быть также построены на селеновых, сернистосеребряных, кремниевых и других вентильных фотоэлементах.

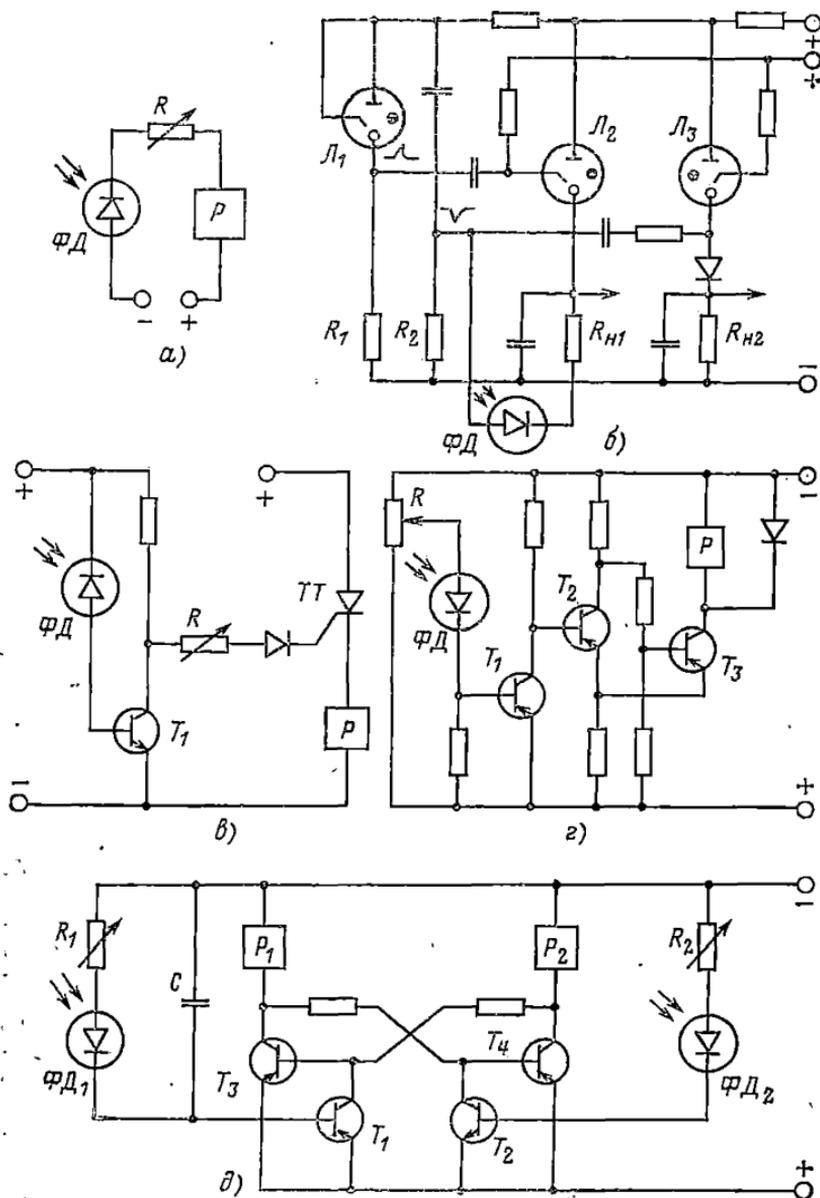


Рис. 5. Фотореле на фотодиодах в диодном режиме.

При использовании в ФЭР усилителей переменного тока или импульсных спусковых устройств при контроле медленно меняющихся потоков излучения может быть применено импульсное питание фотоэлектронного прибора и, в частности, фотодиода [64]. На рис. 5,б показано ФЭР с импульсным питанием фотодиода ФД от релаксационного генератора на тиратроне L_1 . Генератор в зави-

симости от освещенности фотодиода, включенного в разрядную цепь конденсатора C , посылает импульсы на один из двух входов симметричного триггера на тиратронах L_2 и L_3 . При освещенном фотодиоде его обратное сопротивление близко к нулю, причем ток в разрядной цепи генератора ограничивается в основном резистором R_1 . На этом резисторе выделяются положительные импульсы, которые поступают на управляющий электрод тиратрона L_2 и поджигают его. При затемнении фотодиода амплитуда отрицательных импульсов на резисторе R_2 значительно больше амплитуды положительных импульсов на резисторе R_1 , так как сопротивление резистора $R_2 \gg R_1$; происходит зажигание тиратрона L_1 , а тиратрон L_2 гаснет. Выходные сигналы ФЭР в виде положительных напряжений снимаются с резисторов R_n .

Такие достоинства фотодиодов, как малые габариты и масса, низкие рабочие напряжения, полностью реализуются в ФЭР с транзисторными и тиристорными усилителями; при этом предпочтение отдается усилителям с релейной характеристикой [13, 41]. Примерами таких ФЭР являются схемы, приведенные на рис. 5, в—д. В ФЭР на рис. 5, в, 2 усилителя имеют релейную характеристику за счет использования соответственно тиристорного ключа и транзисторного триггера Шмитта, получающих сигналы от предварительных усилителей фототока на транзисторе T_1 .

Фотозлектрическое реле на рис. 5, д представляет симметричный триггер на транзисторах, переключаемый при поочередной засветке фотодиодов $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$. В ФЭР предусмотрена автоматическая установка исходного состояния (соответствующего освещенному фотодиоду $\Phi Д_1$) за счет кратковременного открытия транзистора T_1 при включении питания, когда в цепи его базы протекает ток заряда конденсатора C . Уровень срабатывания ФЭР устанавливается резисторами R_1 и R_2 .

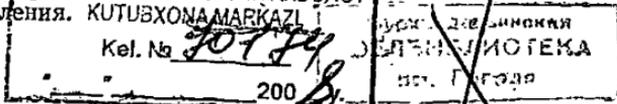
Фотореле на фототранзисторах

Фототранзисторы по чувствительности уступают лишь многокаскадным фотомножителям, однако не требуют, как фотомножители, высоковольтных источников питания и обладают рядом других полезных при использовании в ФЭР качеств (механической прочностью, долговечностью, малыми габаритами и массой).

Фототранзисторы представляют собой сочетание фотодиода со встроенным полупроводниковым усилителем. Расчетная максимальная чувствительность по напряжению у фотодиодов и фототранзисторов одного порядка, однако у фототранзисторов она достигается при меньших нагрузках. Инерционность у фототранзисторов также меньше. В большинстве реальных схем с невысоким входным сопротивлением чувствительность по напряжению фототранзисторов также оказывается больше. Кроме того, устройства с фототранзисторами имеют меньшие габариты.

Фототранзистор можно включать в фоторелейные схемы как обычный транзистор по схемам с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором и как диод со свободной базой, эмиттером или коллектором.

На рис. 6, а—в представлены схемы ряда ФЭР, в которых фототранзисторы в ФЭР в качестве детектора и усилителя до нескольких десятков миллиампер управляются фотоэлектрическими органами P без предварительного усиления. KUTUBXONA MARKAZI



322941, 322944

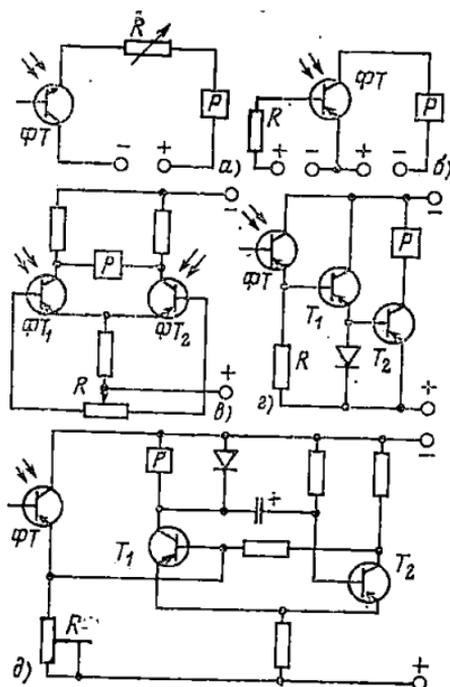


Рис. 6. Фотореле на фототранзисторах.

На рис. 6, в показаны схемы двух ФЭР, в которых ток фототранзисторов воздействует на исполнительный орган после усиления, причем в одном из них для этого использован усилитель постоянного тока, а во втором — ждущий мультивибратор, позволяющий получать выходной сигнал в виде импульса с регулируемыми параметрами.

Фотореле на фототиристорах

По сравнению с другими типами фотоэлементов фототиристоры имеют следующие достоинства, весьма существенные для ФЭР: совмещение в одном полупроводниковом приборе функций светочувствительного элемента, усилителя мощности, формирователя выходного сигнала с релейной характеристикой, благодаря чему уменьшается число активных элементов в ФЭР, упрощается его схема и повышается надежность; высокую нагрузочную способность при малой мощности сигнала управления; возможность поддержания открытого состояния прибора после снятия управляющего сигнала; высокие чувствительность и быстродействие (выше, чем у фототранзисторов).

На рис. 7 приведены схемы нескольких ФЭР на фототиристорах (здесь через R_n обозначены цепи включения исполнительных органов ФЭР или элементы нагрузки ФЭР). Фотоэлектрическое реле на рис. 7, а, питаемое от источника постоянного тока, срабатывает

В ФЭР, показанных на рис. 6, а, б, используется наиболее распространенное включение фототранзисторов по схемам с общим эмиттером и свободной (рис. 6, а) или подключенной (рис. 6, б) базой. Схемы с общим эмиттером и подключенной базой имеют наибольшее усиление по мощности. Подачей положительного смещения на базу в таких схемах достигается увеличение выходного сопротивления $R_{вых}$ фототранзистора переменному току при минимальном темновом токе I_T в цепи коллектора. Для уменьшения влияния фона и темнового тока на работу исполнительного реле фототранзистор включается в плечо моста, который может быть сбалансирован при любой освещенности.

На рис. 6, в приведена схема дифференциального ФЭР. Балансировка схемы при равной освещенности фоторезисторов производится потенциометром R .

На рис. 6, г, д показаны

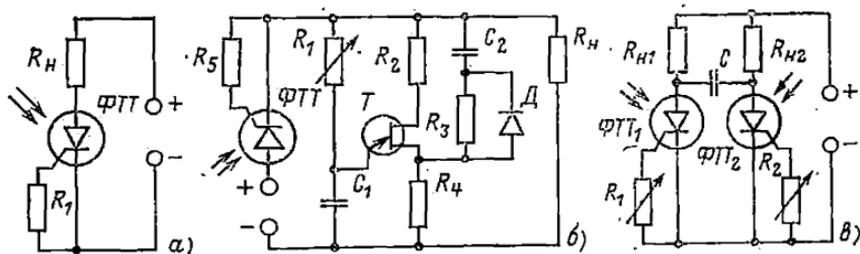


Рис. 7. Фотореле на фототиристорах.

(фототиристор отпирается, и через R_n протекает ток) при освещении фототиристора ФТТ. После снятия управляющего светового сигнала ФЭР не отключается.

Фотоэлектрическое реле на рис. 7,б, также получающее питание от источника постоянного тока, запускается короткими световыми импульсами и остается во включенном состоянии фиксированный промежуток времени [53]. Для отключения ФЭР используется устройство задержки на униполярном транзисторе T , которое запускается при отпирании фототиристора под действием света. Длительность пребывания ФЭР во включенном состоянии определяется постоянной времени цепи $C_1 R_1$.

Фотоэлектрическое реле, питающееся от источника переменного тока, отключается после снятия управляющего светового сигнала при очередном отрицательном полупериоде питающего напряжения. На рис. 7,в представлена схема триггерного ФЭР, переключаемого при поочередной засветке фототиристоров ФТТ₁ и ФТТ₂.

Расчет фотореле

Расчет ФЭР состоит из светотехнического расчета и расчета электрической схемы (электротехнического расчета).

Светотехнический расчет проводится для определения зависимости фототока от параметров источника излучения и элементов оптической схемы, формирующих световой луч и преобразующих изменение контролируемой величины в изменение освещенности фотоэлемента.

Методику светотехнического расчета рассмотрим на примере ФЭР, оптическая схема которого показана на рис. 8. Предположим, что осветитель

ЛО является источником монохроматического излучения с силой I_λ . Тогда лучистый (световой) поток, падающий на линзу $Лн_1$, равен $\Phi_{0\lambda} = I_\lambda \omega$, где ω — телесный угол, под которым видна линза $Лн_1$ из источника ЛО.

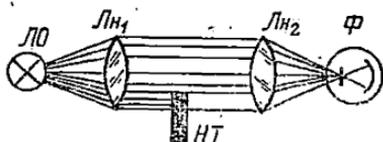


Рис. 8. Оптическая схема фотореле.

Потери лучистой энергии в оптических системах происходят в основном за счет поглощения в материале оптических деталей и отражения от их наружных и внутренних поверхностей. Потери, обусловленные поглощением, вычисляются по формуле

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kl}, \quad (1)$$

где Φ_0 , Φ — световые потоки соответственно до и после поглощения; l — длина пути светового луча в веществе; k — коэффициент поглощения света в веществе.

Потери светового потока $\Delta\Phi$ за счет отражения определяются по формуле

$$\Delta\Phi = \Phi_0 \rho_m, \quad (2)$$

где ρ_m — коэффициент отражения.

Воспользовавшись соотношениями (1) и (2), найдем величину потока Φ_1 , выходящего из линзы $ЛН_1$:

$$\Phi_1 = \Phi_{0\lambda} (1 - \rho_1) (1 - \rho_2) e^{-k_1 l_1},$$

где ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты отражения от поверхностей раздела воздух — стекло и стекло — среда (предполагается, что в общем случае между линзами $ЛН_1$ и $ЛН_2$ может находиться среда, отличная от воздуха); k_1 — коэффициент поглощения стекла линзы $ЛН_1$; l_1 — длина пути света в линзе $ЛН_1$.

Поток Φ_2 , падающий на линзу $ЛН_2$, равен:

$$\Phi_2 = \Phi_1 \alpha e^{-k_0 l_0},$$

где $\alpha = D_2^2 / \left(D_1 + \frac{d_0}{f} l_0 \right)$ — коэффициент, учитывающий непараллельность лучей, обусловленную конечными размерами светящегося тела; k_0 — коэффициент поглощения среды между линзами $ЛН_1$ и $ЛН_2$; l_0 — расстояние между линзами; D_1 и D_2 — диаметры линз; f — главное фокусное расстояние линзы $ЛН_1$; d_0 — диаметр светящегося тела источника $ЛО$.

Монохроматический световой поток, падающий на фотоземлет, в общем случае равен:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{0\lambda} e^{-k_{\lambda 0} l_0} \alpha \prod_{i=1}^n (1 - \rho_{\lambda i}) \prod_{j=1}^m e^{-k_{\lambda j} l_j}, \quad (3)$$

где ρ_λ и k_λ — коэффициенты отражения и поглощения света, зависящие от длины волны монохроматического излучения.

В ФЭР, реагирующих на поглощение лучистой энергии в контролируемой среде, которая может помещаться между линзами $ЛН_1$ и $ЛН_2$, переменной величиной, определяющей значение Φ_λ , а следовательно, и значение выходного сигнала, является коэффициент $k_{\lambda 0}$.

В ряде случаев ФЭР должно реагировать на введение в траекторию светового луча непрозрачного тела $НТ$ (например, при контроле размеров, положений, перемещений). Для таких ФЭР в формулу (3) вводится множитель $\beta = 1 - F'_{н\lambda} / F_{н\lambda}$, где $F_{н\lambda}$ — полное сечение светового потока, $F'_{н\lambda}$ — сечение затененной части светового потока.

Если чувствительность фотоэлемента для излучения с длиной волны λ равна S_λ , то фототок определяется по формуле

$$I_\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \Phi_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

где λ_1 и λ_2 — предельные значения длин волн, ограничивающие область спектральной чувствительности ФЭР.

Электротехнический расчет проводится для нахождения зависимости между фототоком и выходным сигналом ФЭР. Порядок расчета зависит от исходных данных. Часто исходным параметром для расчета является мощность цепи, которой должно управлять ФЭР. В этом случае заданная мощность определяет тип выходного реле, а токи срабатывания и отпускания этого реле определяют схему ФЭР. По необходимому фототоку с учетом данных светотехнического расчета выбирается тип фотоэлемента. К фотоэлементу могут предъявляться дополнительные требования. Так, если применяется модулированный лучистый поток, то необходимо учитывать частотные свойства фотоэлемента. При использовании излучения определенного спектрального состава следует принимать во внимание спектральные свойства фотоэлемента.

Рассмотрим вначале методы расчета и расчетные соотношения для ФЭР, в которых ток фотоэлемента непосредственно (без предварительного усиления) используется для включения исполнительных органов.

Наиболее простыми являются ФЭР с вентильными фотоэлементами (см. рис. 4а). Условия нормальной работы такого ФЭР, реагирующего на перепад светового потока $\Delta\Phi$, определяется соотношениями:

$$I_\Phi + \Delta I_\Phi \geq I_{\text{ср.аб.}}; \quad I_\Phi \leq I_{\text{отп.}}, \quad (5)$$

где I_Φ и $I_\Phi + \Delta I_\Phi$ — токи, создаваемые фотоэлементом в обмотке исполнительного электромеханического реле соответственно при потоках Φ_0 и $\Phi_0 + \Delta\Phi$; $I_{\text{ср.аб.}}$ и $I_{\text{отп.}}$ — соответственно токи срабатывания и отпускания исполнительного реле.

Ток фотоэлемента при заданном потоке Φ определяется либо по световым характеристикам фотоэлемента $I_\Phi = f_\Phi(\Phi)$, либо по формуле

$$I_\Phi = \frac{U_\Phi}{R_\pi} S \Phi - I_s \left(e^{-\frac{qU_\Phi}{kAT}} - 1 \right), \quad (6)$$

где U_Φ — напряжение на фотоэлементе; R_π — сопротивление обмотки исполнительного реле; S — интегральная чувствительность фотоэлемента; I_s — ток насыщения, т. е. величина, к которой стремится темновой ток при $U_\Phi \rightarrow \infty$; A — коэффициент, зависящий от материала фотоэлемента; T — температура; q — элементарный заряд; k — постоянная Больцмана [55]. При $\Phi=0$ $U_\Phi=0$ и темновой ток вентильного фотоэлемента, определяемый соотношением

$$I_\tau = I_s \left(e^{-\frac{qU_\Phi}{kAT}} - 1 \right), \quad (7)$$

равен нулю.

Для расчета ФЭР на фоторезисторах можно использовать уравнение

$$I_{\Phi} = CU^a_{\Phi} \Phi^b + I_T, \quad (8)$$

где C — постоянная величина (удельная чувствительность), определяемая свойствами материала и конструкцией фоторезистора; I_T — темновой ток; a и b — коэффициенты нелинейности вольт-амперной и световой характеристик фоторезистора.

Условия срабатывания ФЭР с фоторезисторами, последовательно включенными с обмоткой электромеханического исполнительного реле (см. рис. 3,а), выражаются соотношениями (5). При включении фоторезисторов в мостовую схему необходимо определить сопротивление резисторов R_1 — R_3 в плечах моста, которые обеспечивают в рабочем диапазоне освещенностей фоторезистора заданные значения тока I_n , протекающего в диагонали моста через нагрузочное сопротивление (обмотку исполнительного реле). Ток I_n равен:

$$I_n = \frac{U_0 (R_1 R_{\Phi} - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2) (R_3 + R_{\Phi}) R_n + R_1 R_2 (R_3 + R_{\Phi}) + R_3 R_{\Phi} (R_1 + R_2)}, \quad (9)$$

где U_0 — напряжение питания мостовой схемы; R_{Φ} — сопротивление фоторезистора, зависящее от освещенности. При этом для ФЭР, срабатывающего при засветке фоторезистора, должны выполняться условия: если $\Phi \geq \Phi_0 + \Delta\Phi$, то $I_n \geq I_{ср\text{аб}}$; если $\Phi_0 < \Phi < \Phi_0 + \Delta\Phi$, то $I_{отп} \leq I_n < I_{ср\text{аб}}$; если $\Phi = \Phi_0$, то $I_n \leq I_{отп}$; для ФЭР, срабатывающего при затемнении фоторезистора, должны выполняться условия: если $\Phi \leq \Phi_0 - \Delta\Phi$, то $I_n \geq I_{ср\text{аб}}$; если $\Phi_0 > \Phi > \Phi_0 - \Delta\Phi$, то $I_{отп} \leq I_n < I_{ср\text{аб}}$; если $\Phi = \Phi_0$, то $I_n \leq I_{отп}$.

Основным расчетным соотношением для ФЭР на фотодиодах (в диодном режиме), включенных последовательно с нагрузкой, является формула

$$I_{\Phi} = S\Phi + I_T. \quad (10)$$

Для расчета ФЭР на фототранзисторах используется уравнение вольт-амперной характеристики $I_n = f(I_{\Phi}, U_n, \Phi)$, где I_n — ток в цепи коллектора, I_{Φ} — ток в цепи базы, U_n — напряжение, приложенное к коллектору. В предположении, что вольт-амперная характеристика линейна в некоторой области $U_n = U_{n1} + U_{n2}$, ее уравнение можно представить в виде

$$I_n = I_{n,t} + S_i \Phi - \beta I_{\Phi} + 0,5 (U_n - U_{n1}) R, \quad (11)$$

где $I_{n,t}$ — темновой коллекторный ток; S_i — чувствительность фототранзистора по току; β — коэффициент усиления фототранзистора по току в схеме с общим эмиттером; R — статическое выходное сопротивление фототранзистора переменному току в темноте [56].

При включении фототранзистора по схеме со свободной базой в (11) $I_{\Phi} = 0$.

При расчете ФЭР на полевом фототранзисторе изменение тока стока I_c под влиянием фототока $I_{\Phi,z}$, протекающего в цепи затвора при засветке, определяется по формуле

$$I_c = S_T R I_{\Phi,z}, \quad (12)$$

где R — внешнее сопротивление в цепи затвора; S_T — крутизна транзистора.

Для расчета ФЭР на фототиристорах (см. рис. 7,а) используются вольт-амперные характеристики (при управлении световыми и токовыми сигналами) и характеристики управления фототиристором, которые могут быть представлены:

$$U(I) = U_m \sqrt{1 - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)I + I_{к0} + \alpha_2 I_{\gamma} + I_{\phi_2} + \alpha_2 I_{\phi_1} + \alpha_1 I_{\phi_3}}{I}}; \quad (13)$$

$$U_{вкл} = U_{вкл0} e^{-\frac{B(\Phi - \Phi_{пор})}{\Phi_{спр}}}, \quad (14)$$

где U — напряжение на аноде тиристора; U_m — напряжение лавинного пробоя; $U_{вкл}$ — напряжение включения; $U_{вкл0}$ — напряжение включения при $\Phi=0$; $\Phi_{пор}$ — минимальный лучистый поток, который чувствует тиристор; $\Phi_{спр}$ — максимальный лучистый поток, характеризующий спрямление характеристики тиристора в характеристику диода; I — выходной ток тиристора; I_{γ} — управляющий ток; I_{ϕ_1} , I_{ϕ_2} , I_{ϕ_3} — первичные фототоки каждого из трех последовательно соединенных $p-n$ переходов тиристора; α_1 и α_2 — коэффициенты усиления по току двух транзисторов различных типов электропроводности, сочетание которых эквивалентно тиристор; n — коэффициент, зависящий от материала и типа электропроводности базовых областей тиристора; B — постоянный коэффициент.

Напряжение питания фототиристора U_0 выбирается из условия

$$U_0 < U_{вкл0}, \quad (15)$$

где U_0 — начальное анодное напряжение.

Сопротивление нагрузки R_n устанавливается из условия

$$U_0/R_n > I_{вкл0}, \quad (16)$$

где $I_{вкл0}$ — ток включения фототиристора.

При выполнении соотношений (15) и (16) обеспечивается устойчивое закрытое состояние ФЭР. Управление включением фототиристора лучистым потоком обеспечивается при соблюдении условия

$$U_0 + U_{\phi} \geq U_{вкл0}, \quad (17)$$

где U_{ϕ} — напряжение, эквивалентное световой «добавке».

Для расчета ФЭР на фотоэлементах, чувствительность которых в значительной степени зависит от освещенности, приложенного напряжения и др., часто используются графоаналитические методы [18, 41, 58]. Сущность одного из них может быть рассмотрена на примере расчета ФЭР по схеме на рис. 3,а. С учетом максимально допустимых для фоторезистора мощности рассеяния $P_{доп}$, рабочих напряжений U_{ϕ} и токов I_{ϕ} по формуле $P_{доп} = I_{\phi} U_{\phi}$ в координатах вольт-амперных характеристик строится кривая предельной мощности (кривая I на рис. 9). На оси ординат откладываются токи $I_{отл}$ и $I_{сраб}$ выбранного исполнительного реле, а также максимальное значение тока $I_{макс}$, задаваемого для получения запаса освещенности из условия $I_{макс} = (1,15 \div 1,2) I_{сраб}$. Прямая 2, соединяющая начало координат с точкой a пересечения кривой I и линии $I_{макс} = \text{const}$, представляет собой спрямленную вольт-амперную характеристику фоторезистора при освещенности срабатывания ФЭР $E_{сраб}$. По углу наклона α этой характеристики опре-

деляется сопротивление фоторезистора $R_{\Phi} = \text{ctg } \alpha$ при освещенности $E_{\text{ср.аб}}$. Величина $E_{\text{ср.аб}}$ вычисляется по формуле $E \approx 1 / (S_y R_{\Phi} F_{\Phi})$, где S_y — удельная чувствительность фоторезистора; F_{Φ} — площадь светочувствительной поверхности фоторезистора; E — освещенность.

Аналогично строится вольт-амперная характеристика фоторезистора при освещенности $E_{\text{отп}}$, соответствующей расчетному току отпущения (прямая 3). Через точку b пересечения линий 1 и $I_{\text{ср.аб}} = \text{const}$ и точку d , соответствующую выбранному напряжению питания фоторезистора $U_{\text{п}}$, проводится нагрузочная прямая 4. Фактическая величина $I'_{\text{отп}}$ определяется точкой z . Сопротивление нагрузочного резистора $R_{\text{н}}$, который необходимо включить последовательно с фоторезистором, определяется величиной $\text{ctg } \beta$, где β — угол наклона нагрузочной прямой. Если величина $R_{\text{н}}$ больше сопротивления реле $R_{\text{р}}$, то последовательно с обмоткой необходимо включить дополнительный резистор с сопротивлением $R_{\text{отр}} = R_{\text{н}} - R_{\text{р}}$. Максимальная мощность, подводимая к нагрузке (оптимальный режим по мощности), обеспечивается при $R_{\text{р}}$, равном удвоенному сопротивлению резистора R_{Φ} при $E = E_{\text{ср.аб}}$.

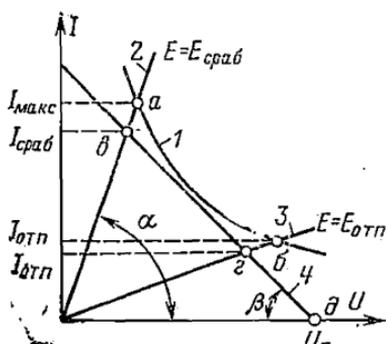


Рис. 9. Графоаналитический метод расчета ФЭР на фотоэлементах.

В ФЭР с усилителями для управления исполнительным органом используется сигнал, полученный в результате усиления фототока или напряжения, создаваемого фототоком на нагрузочном резисторе. Поэтому расчет таких ФЭР состоит из расчета простых фотоэлектрических схем по приведенным ранее формулам и расчета усилителей (расчеты собственно усилителей здесь не приводятся, так как эти вопросы подробно освещены в литературе).

Принципы расчета ФЭР с усилителями могут быть рассмотрены на примере ФЭР с электронно-ламповым усилителем на рис. 2, а. При затемненном фотоэлементе ток через резистор R_0 не протекает и напряжение на сетке усилительной лампы L , а следовательно, и анодный ток лампы I_{a0} определяются только начальным сеточным смещением $U_{cм}$. Величину I_{a0} обычно находят по характеристикам лампы L . При освещении фотоэлемента потоком Φ через резистор R_c начинает протекать ток $I_{\Phi} = S\Phi$, создающий на резисторе R_c падение напряжения: $\Delta U_{c0} = I_{\Phi} R_c = \Phi S R_c$. Так как полярность напряжения ΔU_{c0} противоположна полярности начального отрицательного смещения $U_{cм}$, то ток в анодной цепи возрастает на величину

$$\Delta I_a = S_{\Delta} \Delta U_c = S_{\Delta} S \Phi R_c = \frac{\mu \Delta U_c}{R_i + R_{\text{н}}}, \quad (18)$$

где S_{Δ} и μ — соответственно крутизна характеристики и коэффициент усиления лампы L ; R_i — внутреннее сопротивление лампы; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузочного резистора в анодной цепи усилителя (например, сопротивление обмотки исполнительного реле).

Напряжение на нагрузке R_H равно:

$$U_H = R_H (I_{a0} + S_{л} S \Phi R_c). \quad (19)$$

Формулы (18) и (19) позволяют определить любую из входящих в них величин при заданных остальных.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФУНКЦИИ ФОТОРЕЛЕ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

Фотоэлектрические пороговые устройства для индикации предельных значений контролируемых и регулируемых параметров

Практически полное отсутствие обратного влияния ФЭР на контролируемый объект, их простота и универсальность обеспечили широкое использование ФЭР для индикации заданных, например предельных, значений разнообразных параметров в устройствах сортировки, разбраковки, защиты в системах автоматического контроля и регулирования. При этом контролируемая величина либо непосредственно воспринимается ФЭР, либо предварительно преобразуется в неэлектрическую величину другого рода (чаще всего в механическое перемещение).

Так, ФЭР могут быть встроены в любой даже самый маломощный измерительный прибор, осуществляющий преобразование контролируемой величины в отклонение стрелочного или светового указателя. Подобные фоторелейные устройства называют светоконтактными (СКУ). Принцип их действия основан на скачкообразном изменении условий освещения фотоэлементов при достижении контролируемой величиной заданного значения [24, 36].

На рис. 10 показана одна из возможных конструкций СКУ для стрелочных измерительных приборов, предназначенных для установки в микроамперметре типа М24. Светоконтактное устройство выполнено в виде фотодиода 1 и миниатюрной лампы накаливания (или светодиода) 3, смонтированных на подвижном кронштейне 4, который с по-

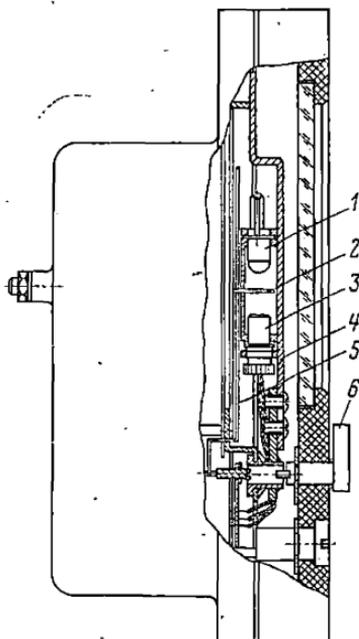


Рис. 10. Конструкция светоконтактного устройства для стрелочного прибора.

мощью рукоятки 6 можно устанавливать у любого деления шкалы; для затемнения фотодиода используется флажок 2 из фольги, закрепленный на стрелке 5.

В приборе предусмотрена возможность только ручной установки СКУ, что затрудняет работу оператора, особенно когда прибор расположен в труднодоступном месте. Для дистанционной установки необходимо управляемое перемещение СКУ вдоль шкалы прибора, например, с помощью сельсина, что значительно усложняет прибор.

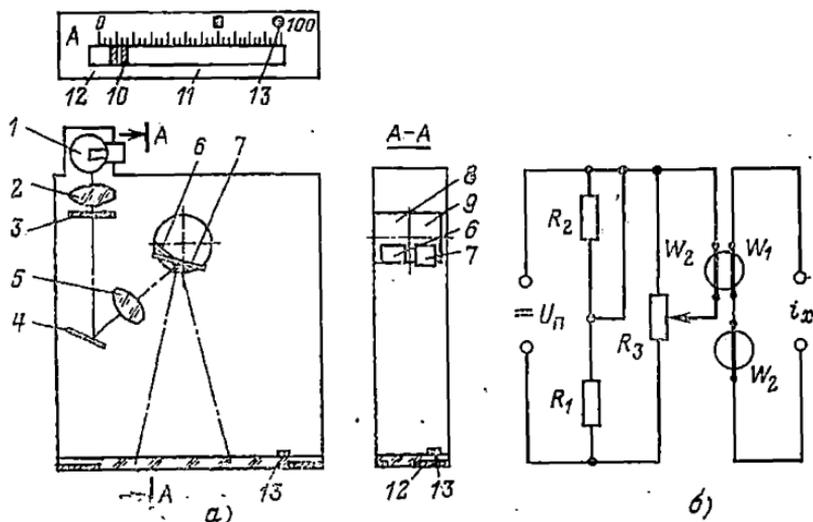


Рис. 11. Конструкция и схема СКУ для прибора со световым указателем.

На рис. 11 показаны конструкция (а) и принципиальная схема (б) прибора со световым указателем, в котором сравнительно простыми средствами обеспечивается дистанционная установка уровней срабатывания СКУ [7]. Луч света от осветителя 1 через конденсор 2, диафрагму 3 с помощью неподвижного зеркала 4 и объектива 5 направляется на подвижные зеркала 6 и 7, которыми снабжены основной (с обмотками w_1 и w_3) и дополнительный (с обмоткой w_2) измерительные механизмы 8 и 9, расположенные соосно. Оптическая система наряду с основным световым указателем 10 формирует дополнительный указатель 11, перемещающийся вдоль шкалы 12 одновременно с основным и взаимодействующий с фотоэлементом 13. Уровень срабатывания СКУ устанавливается с помощью дистанционно расположенного регулируемого источника тока, содержащего источник напряжения U_{II} и мостовую схему, образованную резисторами R_1 , R_2 и потенциометром R_3 . Смещением движка потенциометра R_3 из среднего положения, соответствующего балансу моста, в обмотку w_3 подается ток и световой указатель 11 смещается относительно указателя 10 на величину, соответствующую заданному уровню контролируемой величины i_x . Уровень срабатывания СКУ отсчитывается по положению движка потенциометра R_3 , градуированного в делениях шкалы прибора. При набегании

светового указателя 11 на фотоэлемент 13. фотоэлемент засвечивается и происходит срабатывание исполнительного органа ФЭР.

Фотоэлектрические счетные устройства

Фотоэлектрические счетные устройства (ФСУ) предназначены для определения общего числа или частоты световых импульсов и используются для счета дискретных величин (числа изделий на конвейере, количества частиц в пылемерах и т. п., числа оборотов вращающихся элементов машин и приборов, частоты и числа колебаний маятника при измерениях вязкости, давлений жидкостей и газов и др.), контроля и регулирования разнообразных величин, которые могут быть преобразованы в последовательность световых импульсов (в системах программного управления обрабатывающими станками, в приборах с цифровым отсчетом, в системах телеуправления и телеконтроля и др.).

Фотоэлектрические счетные устройства состоят из ФЭР, преобразующих в электрические сигналы световые импульсы, частота или число которых зависят от значения контролируемой величины, и индикаторов счета, воспринимающих эти импульсы. В ФСУ, измеряющих частоту импульсов, используются усредняющие по времени (интегрирующие) схемы, выходной сигнал которых пропорционален среднему числу приходящих в единицу времени импульсов. По сравнению с другими типами счетных устройств, например электроконтактными, ФСУ обладают такими достоинствами, как универсальность применения, высокая скорость счета, отсутствие контакта со считываемыми изделиями, возможность учета количества изделий независимо от стадии технологического процесса, его агрегатного состояния, формы и массы изделий [30, 41].

На рис. 12,а приведена схема универсального ФСУ для счета мелких предметов, например шурупов, зерен и т. п. [77]. При прохождении предметов между источником света и фотодиодом ФД вырабатывается сигнал (порядка 0,2 В), превышающий верхний порог срабатывания триггера Шмитта на транзисторах T_1 и T_2 и открывающий транзистор T_1 . Для повышения быстродействия ФСУ, ограниченного инерционностью электромеханического индикатора счета C_1 , в схему введено пересчетное устройство из четырех последовательно соединенных симметричных транзисторных триггеров $TR_1—TR_4$. Для исключения ложных срабатываний, вызываемых, например, посторонними предметами, которые могут появиться в «поле зрения» счетчика, а также для избирательного счета объектов с различными геометрическими и другими характеристиками необходимы ФСУ, реагирующие на изделия определенных размеров, конфигурации и т. п.

На рис. 12,б представлена схема ФСУ, различающего на конвейере изделия определенной конфигурации. Схема содержит несколько ФЭР. Зажигание тиратрона L_1 , включающего счетчик C_1 , возможно при затемнении фоторезисторов $ФР_1—ФР_3$, при котором срабатывают все ФЭР и зажигаются тиратроны $L_1—L_3$. Расположение фоторезисторов обеспечивает их одновременное затемнение лишь при прохождении подлежащих учету изделий заданной конфигурации.

На базе ФСУ строятся простые, надежные, быстродействующие аналого-цифровые преобразователи угловых и линейных перемещений для бесконтактного отсчета показаний приборов контроля и

управления в цифровой форме [12, 41]. На рис. 13 показана структурная схема одного из таких преобразователей, предназначенного для прибора со световым указателем.

Луч света от зеркальца 1 подвижной части измерительного механизма направляется на аналоговую шкалу 2 и цилиндрическое зеркало 3, снабженное двумя рядами смещенных друг относительно друга растров, состоящих из отражающих и неотражающих участков (применение двойного растра повышает чувствительность пре-

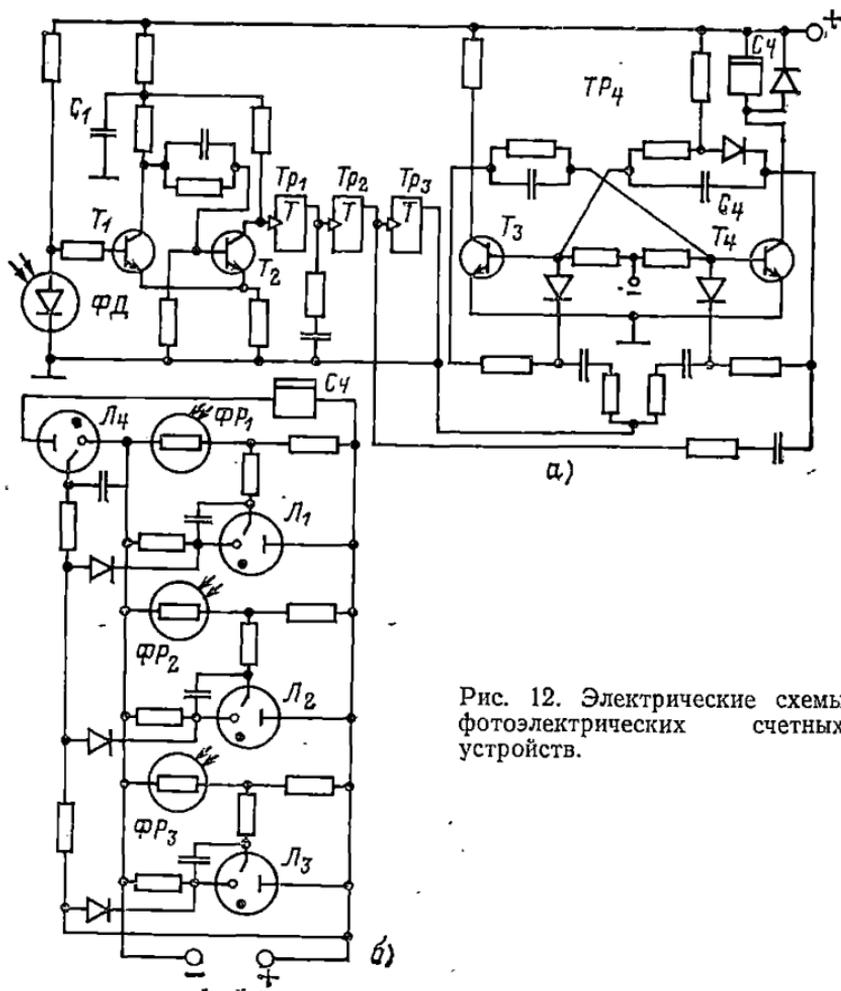


Рис. 12. Электрические схемы фотоэлектрических счетных устройств.

образователя). Отраженные от зеркала 3 лучи попадают на фотоэлементы 4. Образующиеся при этом импульсы фототока, число которых пропорционально количеству отражающих участков растра, пройденных лучом, через усилитель 5 поступают на счетчик 7, фиксирующий цифровое выражение измеряемой величины. Управляющее преобразованием программное устройство 8 кратковременно открывает вентиляющую схему б перед счетчиком и производит сброс его на нуль при последующем измерении.

Фотоэлектрические логические элементы

Фотоэлектрические логические элементы (ФЛЭ) обладают следующими достоинствами: направленностью действия (отсутствием обратной связи с выхода на вход), высокой помехозащищенностью, низким порогом чувствительности, простотой, надежностью, имеют электрическую развязку функциональных элементов.

Принципы построения ФЛЭ для моделирования функций двух переменных A и B иллюстрируются схемами на рис. 14, выполненными на электролюминесцентных конденсаторах (ЭЛК), последова-

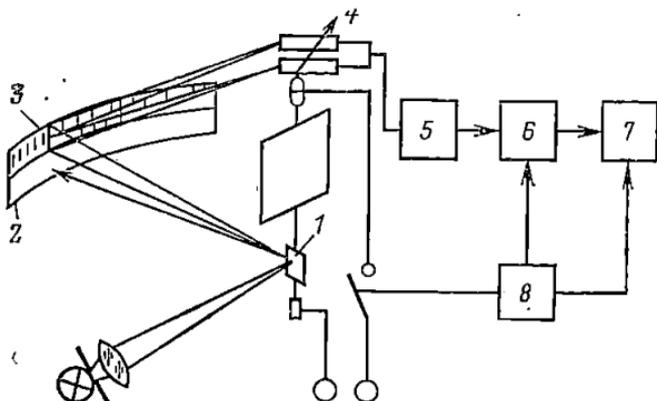


Рис. 13. Структурная схема фотоэлектрического преобразователя угол — код.

тельно или параллельно которым включены фоторезисторы (схема с последовательно соединенными ЭЛК и фоторезистором соответствует логическому тождеству, или повторителю, а схема с параллельным включением ЭЛК и фоторезистора — логическому отрицанию, или инвертору).

В схеме И (конъюнктор), показанной на рис. 14,а, появление выходного сигнала (возбуждение ЭЛК) обеспечивается при одновременном возбуждении входов A и B , когда засвечиваются оба последовательно включенных фоторезистора ΦP_A и ΦP_B . В схеме ИЛИ (дизъюнктор), приведенной на рис. 14,б, фоторезисторы включены параллельно, и сигнал на выходе появляется при засветке любого из них. В схеме ИЛИ — НЕ (элемент Пирса), показанной на рис. 14,в, ЭЛК возбужден при затемнении обоих фоторезисторов. При подаче возбуждающего сигнала на любой из входов ЭЛК шунтируется и гаснет. Схемы на рис. 14,г—е моделируют такие логические функции, как отрицание конъюнкции, запрет, импликация.

Увеличивая количество используемых ЭЛК и фоторезисторов, можно моделировать подобным образом логические функции более чем двух переменных.

На рис. 14,ж представлена схема фотоэлектрического многустойчивого элемента [67]. Конденсатор C заряжается от источника постоянного напряжения U_0 через фоторезистор ΦP_2 , сопротивление которого изменяется под воздействием последовательности импульсов $\Phi_{вх}$ с нормированными по величине световым потоком и дли-

гельностью. Каждый импульс $\Phi_{вх}$ обеспечивает приращение напряжения на конденсаторе на определенную величину. Как только это напряжение достигнет уровня, соответствующего опорному напряжению срабатывания $U_{оп}$ компаратора на диоде D , ЭЛК вырабатывает световые импульсы $\Phi_{об}$ и $\Phi_{вых}$. Первый из них предназначен для запуска схемы сброса на фоторезисторе ΦP_1 , обеспечивающей разряд конденсатора, а импульс $\Phi_{вых}$ является выходным. Отношение частот импульсов $\Phi_{вх}$ и $\Phi_{вых}$, определяющее количество устойчивых состояний элемента, благодаря нормированию импульсов $\Phi_{вх}$ фиксировано и зависит от свойств накопителя и уровня срабатывания компаратора.

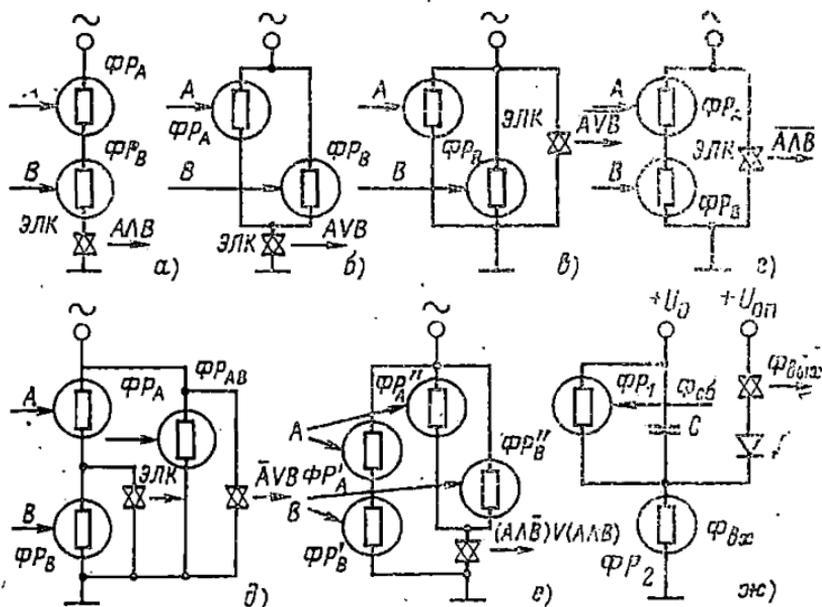


Рис. 14. Фотоэлектрические логические ячейки.

Фотоэлектрические логические элементы, аналогичные приведенным на рис. 14, выполняются и на других типах фотоэлементов и управляемых источников излучения, в частности на оптронных парах: светодиод — фотодиод, фототранзистор — фототиристор и др.

Для обеспечения электрического выхода в ФЛЭ по схемам на рис. 14 и подобным им, имеющим только оптический выход, вводятся дополнительные фотоэлементы, воспринимающие излучение выходного источника излучения.

Фотоэлектрические коммутаторы

На базе фотоэлементов с высокой кратностью изменения сопротивления под действием излучения строятся фотоэлектрические коммутаторы (ФК), достоинствами которых являются бесконтактное управление, коммутация без разрыва цепи, электрическая развязка входных (управляющих) и выходных (сигнальных) цепей при обеспечении возможности подачи управляющих сигналов одновре-

менно на большое число входных элементов и выполнения выходных цепей как на постоянном, так и переменном токе, высокое быстродействие, простота конструкции, большой срок службы.

В ФК фотоэлементы используются в ключевом режиме, при котором полное сопротивление освещенного фотоэлемента по сравнению с полным сопротивлением нагрузки должно быть настолько мало, чтобы на нагрузке выделялось все коммутируемое напряжение. Темновое же сопротивление фотоэлемента должно быть настолько велико, чтобы все коммутируемое напряжение практически падало на нем, а напряжение на нагрузке примерно равнялось нулю. Качество коммутатора оценивается коэффициентом коммута-

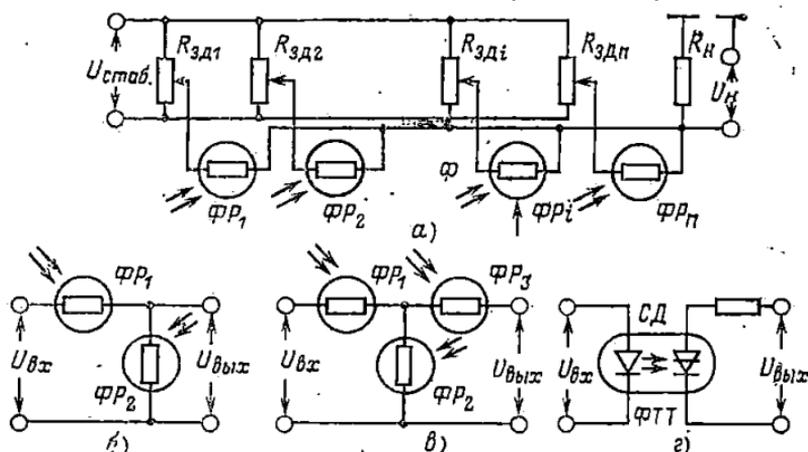


Рис. 15. Фотоэлектрические коммутаторы.

ции, равным отношению напряжений на нагрузке в «замкнутом» и «разомкнутом» состояниях ключа.

На рис. 15,а приведена схема ФК на фоторезисторах со световым управлением [57]. При поочередном освещении фоторезисторов напряжение U_H на сопротивлении нагрузки R_H переключается в соответствии с настройкой задающих потенциометров $R_{зд}$. Благодаря большому отношению сопротивлений затемненного R_T и освещенного R_Φ фотоэлементов при $R_\Phi \ll R_H \ll R_T$ можно считать, что при затемнении всех фоторезисторов напряжение U_H будет близко к нулю, а при освещении одного из фоторезисторов (например, ΦP_i)

$$U_H = U_i \frac{R_H}{R_H + R_\Phi},$$

где U_i — напряжение, снимаемое с потенциометра $R_{зди}$.

Коэффициент коммутации и коэффициент передачи, равный отношению выходного напряжения к коммутируемому, повышаются при переходе от схем с последовательным включением фоторезисторов и нагрузки к Г- и Т-образным, где переключение производится соответственно двумя и тремя фоторезисторами (рис. 15,б,в).

Фотоэлектрические коммутаторы с электрическим управлением строятся на ключевых оптронах (рис. 15,г). Управляющий сигнал здесь в виде тока или напряжения подается в цепь источника

излучения (светодиод СД на рис. 15,з), а выходной сигнал формируется в цепи фотозлемента (фототиристор ФТТ на рис. 15,з). Входные и выходные цепи здесь полностью электрически изолированы друг от друга.

Фотозлектроэлектрические коммутаторы применяются в измерительных приборах, дискретных задающих устройствах, системах импульсного регулирования, уплотнителях каналов радиорелейных линий и др. [57, 59].

Фотозлектрооптические усилители

Фотозлектрооптические усилители электрических сигналов (ФОУ) отличаются низким порогом чувствительности (10^{-12} А и меньше), большим усилением, малым дрейфом нуля, универсальностью применения, простотой конструкции, что обусловило их использование в разнообразных высокочувствительных измерительных приборах, автоматических регуляторах и др.

Принцип фотозлектрооптического усиления основан на том, что отклонение подвижного органа чувствительного прибора (например, стрелки или рамки гальванометра, электрометра и т. п.), воспринимающего усиливаемый электрический сигнал, управляет освещенностью фотозлемента. При этом небольшие изменения входного сигнала могут вызывать значительные изменения фототока.

На рис. 16 представлены схемы ФОУ, построенные на базе гальванометра и дифференциального фоторезистора типа ФС-К7. При повороте зеркала гальванометра под действием усиливаемого сигнала происходит перераспределение светового потока, создаваемого осветителем, на фоторезисторе. Происходящее при этом изменение сопротивлений половинок фоторезистора преобразуется в соответствующее изменение тока (рис. 16,а) или напряжения (рис. 16,б).

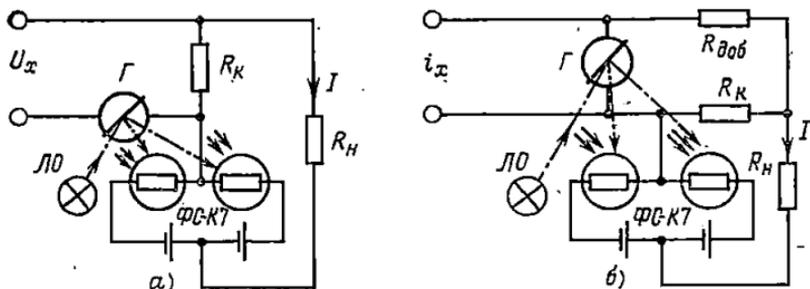


Рис. 16. Фотозлектрооптические усилители.

На рис. 16,а выходной ток I связан с входным напряжением U_x и сопротивлением компенсационного резистора R_K соотношением $I \approx U_x / R_K$. При $U_x = 0$ рамка гальванометра устанавливается в положении, при котором освещенность обеих половинок фоторезистора одинакова и ток I через нагрузочное сопротивление R_H равен нулю. При $U_x \neq 0$ рамка поворачивается, освещенность одной половины фоторезистора увеличивается, а другой — уменьшается, благодаря чему в цепи R_H протекает ток, величина которого обеспечивает со-

здание на резисторе R_K напряжения, компенсирующего напряжение U_x , т. е. выполняется условие $U_x = IR_K$.

Входной и выходной токи на рис. 16,б связаны соотношением $I \approx i_x(R_K + R_{доб})/R_K$. Эта формула, как и предыдущая, не учитывает погрешность недокомпенсации, связанную с наличием противодействующего момента растяжек, на которых закреплена рамка гальванометра. При правильном выборе элементов схемы эта погрешность обычно не превышает $\pm 0,5\%$.

Для упрощения регуляторов, использующих ФОУ, необходимый закон регулирования можно задавать непосредственно в компенсационных цепях гальванометра [15]. Так, например, если в цепь обратной связи ФОУ ввести RC -звено, то напряжение U_H на выходе ФОУ изменяется по уравнению изохромного регулятора:

$$U_H = \frac{R}{R_K} \left(U_x + \frac{1}{RC} \int_0^t U_x dt \right).$$

Фотоэлектрические генераторы

Фотоэлектрические генераторы (ФГ), обеспечивающие управление частотой, периодом и другими характеристиками возбуждаемых колебаний в функциях параметров потока лучистой энергии, позволяют строить преобразователи типа освещенность — частота, освещенность — временной интервал и т. п., используемые в разнообразных системах управления, измерения, телеметрии.

Фотоэлектрические генераторы (рис. 17) представляют собой генераторы электрических колебаний (например, мультивибраторы, блокинг-генераторы), в которых в качестве элементов, определяющих частоту и другие параметры возбуждаемых колебаний, используются фотоэлементы (фоторезисторы, фотодиоды, фототриоды и др.).

На рис. 17,а приведена схема простейшего релаксационного ФГ на неоновой лампе (вместо неоновой лампы может использоваться тиратрон с холодным катодом, стабилитрон и др.). Конденсатор C заряжается через фоторезистор ΦP до напряжения U_3 зажигания разряда в неоновой лампе L , после чего он разряжается через лампу L и сопротивление нагрузки R_H до напряжения U_H погасания разряда. Этот процесс повторяется до тех пор, пока к схеме приложено напряжение питания. В результате на R_H со-

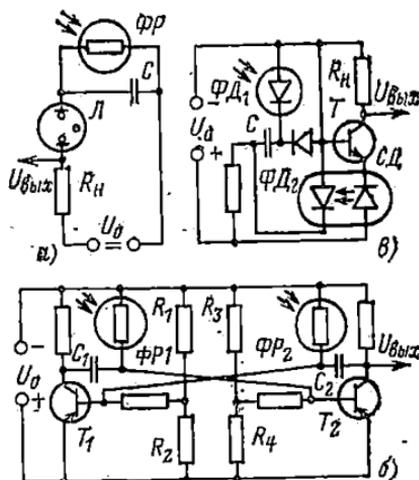


Рис. 17. Фотоэлектрические генераторы.

здается напряжение, пульсирующее с частотой

$$f = \frac{1}{R_{\Phi} C \ln \frac{U_0 - U_{\Pi}}{U_0 - U_3}}, \quad (20)$$

где R_{Φ} — сопротивление фоторезистора; U_0 — напряжение питания. При изменении освещенности фоторезистора меняются R_{Φ} , а следовательно, и частота f .

На рис. 17,б показана схема мультивибратора с включенными во времязадающие RC -цепи фоторезисторами ΦP_1 и ΦP_2 , освещенность которых определяет частоту f и период T возбуждаемых колебаний, причем

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_{\Phi} C \left(\ln 2 - \ln \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} \right)}. \quad (21)$$

Фоторезисторы (или фотодиоды) могут быть также включены вместо резисторов R_1 и R_3 или R_2 и R_4 в цепи делителей напряжения $R_1=R_2$ и $R_3=R_4$, создающих напряжение смещения на базе транзисторов T_1 и T_2 . [14].

Одной из разновидностей ФГ является мультивибратор, собранный по типовым схемам на фототранзисторах, освещенность которых определяет частоту генерируемых импульсов. На базе LC -генераторов с фотоварикапами в колебательном контуре строятся высокочастотные ФГ синусоидальных колебаний.

На рис. 17,в приведена схема ФГ прямоугольных импульсов с оптической положительной обратной связью (ПОС), осуществляемой с помощью оптрона [66]. Применение оптрона позволяет исключить обратную реакцию цепи ПОС и тем самым обеспечить неискаженную форму выходных импульсов. Принцип работы этого ФГ заключается в следующем. При включении питающего напряжения конденсатор C начинает заряжаться через резистор R и фотодиод ΦD_1 .

Когда отрицательный потенциал на базе транзистора T превысит потенциал эмиттера, транзистор приоткрывается и через светодиод $СД$ начинает протекать ток. Светодиод подсветит фотодиод ΦD_2 , который еще больше увеличит ток базы I_B транзистора. Если $h_{21Э} K > 1$ ($h_{21Э}$ — коэффициент передачи тока транзистора, K — коэффициент передачи оптрона), то транзистор лавинообразно перейдет в состояние насыщения и конденсатор C начинает перезаряжаться по цепи $СД$ — переход эмиттер-база транзистора — ΦD_2 . Когда ток базы вследствие заряда конденсатора уменьшается до значения $I_B = I_K / h_{21Э} \approx (U_0 - U_{сд}) / h_{21Э} R_{\Pi}$ (I_K — коллекторный ток насыщенного транзистора, $U_{сд}$ — падение напряжения на светодиоде), транзистор лавинообразно переходит в состояние отсечки. На этом формирование импульса заканчивается и начинает формироваться пауза. В состоянии отсечки транзистор удерживается положительным потенциалом на конденсаторе C , разряжающимся по цепи $R - C - \Phi D_1$. После превышения потенциалом базы потенциала эмиттера процесс повторяется.

Длительность генерируемого импульса определяется по формуле

$$t_{\text{н}} \approx RC \ln \frac{h_{21Э} K (U_0 - U_{\text{сд}}) - h_{21Э} R_{\text{н}} I_{\text{ф}}}{U_0 - U_{\text{сд}} - h_{21Э} R_{\text{н}} I_{\text{ф}}}, \quad (22)$$

где $I_{\text{ф}}$ — ток фотодиода $\Phi Д_1$, связанный с управляющим потоком лучистой энергии соотношением (10).

При использовании в качестве $\Phi Д_1$ фотодиода (или фоторезистора) дополнительного оптрона обеспечивается возможность электрического управления ФГ.

Фотоэлектрические генераторы позволяют генерировать электрические колебания в диапазоне частот от сотых долей герца до десятков и сотен килогерц.

Фотоэлектрические запоминающие устройства

Используя фотоэлектрические бистабильные элементы в виде ФЭР на базе оптронов с положительной оптической обратной связью от источника света к фотоэлементу, фотоэлектрические триггеры и т. п., можно создавать фотоэлектрические запоминающие устройства (ФЗУ) для вычислительной техники, систем контроля и управления, отличающиеся небольшими габаритами, высокой надежностью хранения информации и малым потреблением энергии. Перспективными являются ФЗУ в виде матрицы бистабильных (двоичных) элементов на оптронах. Управляемый источник света и фотоэлемент оптронной пары каждого элемента памяти включаются последовательно, причем для осуществления положительной обратной связи, обеспечивающей бистабильность, часть светового потока, излучаемого источником, используется для подсвета фотоэлемента. Установка элемента памяти в состояние «1», соответствующее режиму свечения источника, производится кратковременным приложением к последовательной цепи увеличенного напряжения или при освещении фотоэлемента от внешнего источника света; сбрасывание в «0» (стирание хранимой информации) производится при кратковременном снятии питающего напряжения или при облучении от внешнего источника дополнительного фотоэлемента, подключаемого параллельно источнику света оптрона.

Элементы памяти подобных ФЗУ, выдающие световые сигналы, независимы от считывающих устройств, что обеспечивает возможность параллельного и последовательного считывания в любом порядке информации, хранимой в элементах памяти, при любых форматах и конфигурациях ФЗУ.

Рассматриваемые ФЗУ позволяют выполнять в процессе считывания многие промежуточные операции по обработке данных. Так, на базе ФЗУ можно построить ассоциативную память; можно проводить обработку данных с помощью заданной корреляционной функции по мере их считывания.

Фотоэлектрические считывающие устройства

Фотоэлектрические считывающие устройства (ФС) позволяют преобразовывать в электрические сигналы разного рода аналоговую и дискретную информацию (графики, цифровой и буквенный текст,

голограммы, кодовые комбинации элементов с различной прозрачностью, отражательной способностью и плотностью излучения), зафиксированную на оптических носителях (перфоносителях, фотопластинах, кинолентах, чертежах, матрицах оптоэлектронных запоминающих устройств и др.).

Распространенность оптических носителей информации, отличающихся простотой, разнообразием реализаций, возможностью высокой плотности записи информации, надежностью ее хранения, обусловила широкое применение ФС в вычислительных системах, в системах автоматического контроля и регулирования, для считывания показаний различных приборов и индикаторов и др. [10, 27].

Принцип работы ФС состоит в следующем. Световой луч направляется на носитель информации. Записанная информация меняет характер отраженного или прошедшего через носитель луча — его интенсивность, фазу, поляризацию. Далее луч фокусируется на фотоэлемент, флуктуации тока которого могут быть интерпретированы как двоичные единицы и нули или другие признаки считываемой информации. Поиск информации осуществляется системами, отклоняющими или сканирующими луч либо перемещающими носитель.

На рис. 18,а показана структурная схема широко применяемых в цифровых вычислительных машинах ФС для считывания информации с перфолент и перфокарт и ввода ее в оперативные запоминающие устройства *ОЗУ*. Луч света от источника *ИС*, сформированный оптической системой *ОС*, через отверстие в перфоносителе *ПН* попадает на фотоэлемент *Ф*, соединенный с усилителем *У*.

При отсутствии в данном месте носителя отверстия сигнал на выходе усилителя отсутствует (считывание «0»); если же при движении носителя против источника света появляется отверстие, на выходе носителя возникает импульс (считывание «1»). Такие ФС выполняются пяти-восьмиканальными (по числу дорожек в перфоносителях); они позволяют считывать со скоростью порядка тысяч цифр в секунду и высокой надежностью (один сбой на 10^7 — 10^9 знаков).

На рис. 18,б изображена схема ФС для считывания информации в виде прозрачных линий на кинолентке [63]. С помощью конденсатора *К* и матового стекла кинолентка *КП* освещается рассеянным светом. На темном фоне пленки появляется небольшое излучающее свет поле, ограниченное по оси ординат краями линии графика, а по оси абсцисс — краями координатной маски *КМ*. Объективом *Об* и полупрозрачным зеркалом *ПЗ* изображение с пленки передается в плоскости двух фотометрических клиньев *КФ*. Потоки света от излучающего поля, ослабленные в клиньях пропорционально ординате считываемой точки, коллективом *Кл* фокусируются на катодах фотоумножителей *Ф*. Благодаря тому, что оптический клин в одном канале измерения потоков света повернут относительно второго на 180° , между коэффициентами ослабления их для считываемой точки имеет место обратная пропорциональная зависимость. Отношение фототоков однозначно определяет ординату точки и не зависит от изменения интенсивности освещения, прозрачности пленки, ширины линии графика. Получение отношения сводится к вычитанию в сравнивающем устройстве *СУ* логарифмов сигналов с выхода логарифмических усилителей *ЛУ* фототоков. Аналого-цифровой преобразователь *АЦП* преобразует отношение токов в двоичный код, пропорциональный ординате считываемой точки.

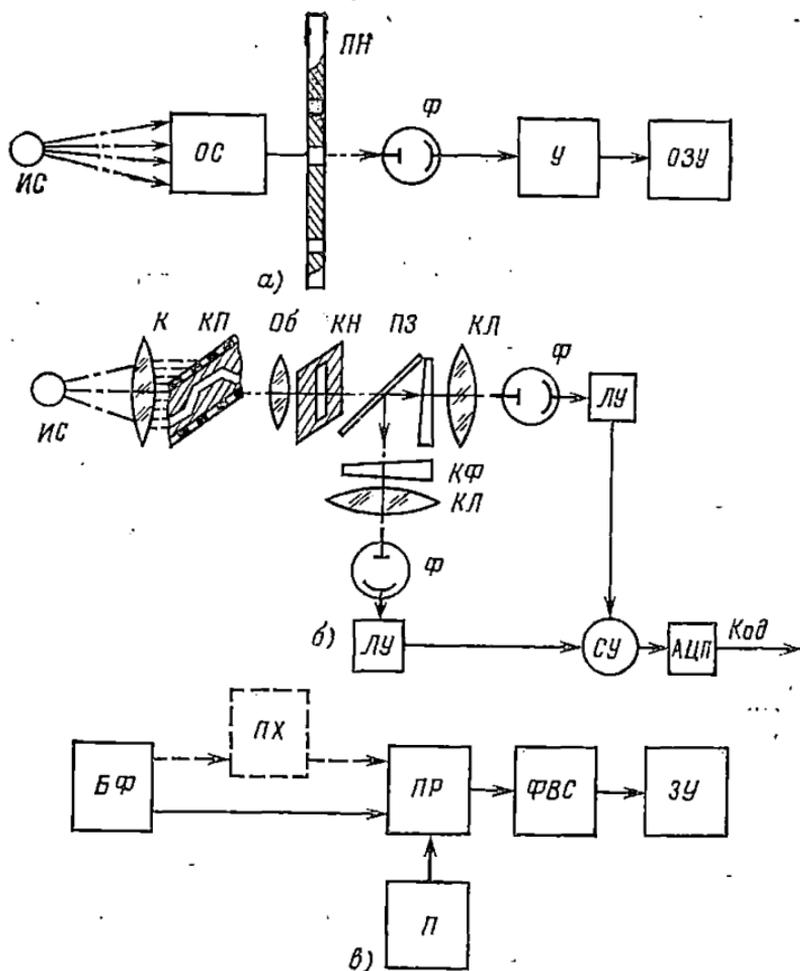


Рис. 18. Фотоэлектрические считывающие устройства.

Фотоэлектрическое считывающее устройство для считывания информации с ФЗУ представляет матрицу фотоэлементов по одному для каждого излучающего свет элемента. Весьма перспективны голографические запоминающие устройства с фотоэлектрическим считыванием [74]. Запись и считывание информации здесь осуществляются с помощью луча лазера, который может направляться в любую заданную позицию, определяемую двумя координатами. В каждой из таких позиций расположен участок запоминающей среды, в котором записывается одна голограмма, содержащая отдельный массив—страницу информации. Отклоненный луч расщепляется на два: опорный луч, который направляется непосредственно на выбранное для данной страницы место в запоминающей среде, и объектный луч, который, прежде чем попасть на то же место запоминающей среды, отражается от двумерной матрицы световых модуляторов. Эта матрица, называемая составителем страниц, преоб-

разуется информация, подлежащую записи, в пространственные изменения интенсивности или фазы объектного светового луча. В выбранном для страницы месте опорный и объектный лучи образуют интерференционную картину, представляющую собой голограмму страницы информации. Голограмма по своей природе избыточна (поскольку свет от каждого отдельного модулятора в составителя странице распределяется по всей площади голограммы), что позволяет извлекать информацию даже в случаях, когда запоминающая среда имеет случайные дефекты.

Для считывания выбранной страницы используется только опорный луч, при освещении которым голограммы в плоскости составителя страницы восстанавливается действительное изображение матрицы данных. Матрица фотоэлементов преобразует это изображение в электрические сигналы, которые в свою очередь изменяют состояние транзисторных триггеров, выполненных, например, в виде интегральной матрицы. Если такую матрицу снабдить соответствующей системой адресации, то она может функционировать как оперативное запоминающее устройство.

Фотоэлектрические устройства для считывания (распознавания) знаков рукописного или машинописного текста, называемые часто фотоэлектрическими читающими автоматами (ФЧА), строятся, как правило, по схеме, приведенной на рис. 18,а. Дискретные графические знаки (буквы, цифры, знаки математических операций и т. п.) в фотоэлектрическом блоке БФ преобразуются в электрические сигналы. Эти сигналы поступают в блок принятия решений ПР, где с помощью логических схем или соответственно запрограммированных ЭВМ осуществляется их сравнение с эталонными сигналами, хранящимися в памяти П считывающего устройства. После принятия решения о соответствии считываемого сигнала тому или другому эталону поступает команда на блок формирования выходного сигнала ФВС, который выдает кодовый сигнал, соответствующий считываемому знаку.

В ФЧА, где осуществляется поэлементная развертка считываемых знаков, имеется блок промежуточного хранения ПХ информации об элементах отдельного знака в процессе преобразования этого знака. После распознавания информация накапливается в буферном запоминающем устройстве ЗУ, где происходят группирование, редактирование прочитанной информации и ввод ее на машинный носитель (перфолисты, перфокарты, магнитную ленту) или непосредственно в ЭВМ.

По используемому шрифту ФЧА делятся на три категории: устройства с псевдораспознаванием знаков с применением кодирования знаков; устройства для считывания одного специального шрифта; устройства для считывания нескольких типовых шрифтов.

Фотоэлектрические читающие автоматы первой категории не распознают по существу знаки, а реагируют на коды. Так, ФЧА фирмы «Дженерал электрик» (США) считывают кодовый шрифт, формируемый из кодовых вертикальных черточек, расположение которых походит по форме на цифру или другой знак (рис. 19,а). Для кодирования используются пропуски вертикальных черточек; при сканировании фотоэлементом образуется двоичный код, требующий простой логики распознавания.

Шрифт, показанный на рис. 19,б, легче для распознавания, однако требует не одну, а две фотосчитывающие головки. Знаки построены так, что их контуры находятся между мнимыми линиями сетки, разделяющей знак на десять зон — пять в верхнем ряду и

пять в нижнем. Каждый знак развертывается справа налево одновременно в верхнем и нижнем рядах. При обнаружении в зоне вертикальной линии вырабатывается импульс, который кодируется двоичной «1»; в противном случае фиксируется «0». Сочетание двоичных значений, полученных в результате считывания, дает 10-разрядный код этого знака.

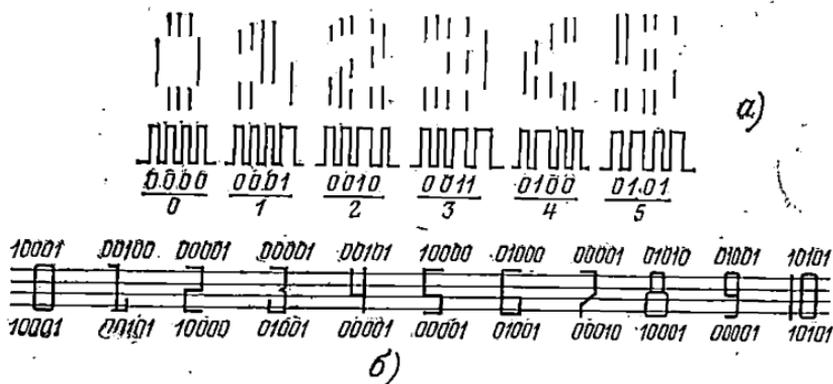


Рис. 19. Шрифты, считываемые фотоэлектрическими читающими автоматами.

Принцип распознавания знаков специализированных шрифтов ФЧА второй категории обычно состоит в установлении при помощи логических схем наличия или отсутствия характерных штриховых горизонтальных и вертикальных элементов, на которые может быть разделен каждый элемент. В одном из ФЧА такого типа каждый знак развертывается на 30 строк, причем развертывающая система позволяет непосредственно измерять вертикальные штриховые элементы, а горизонтальные элементы определяются путем подсчета количества пересечений разверткой этих элементов.

Фотоэлектрические читающие автоматы третьей категории, помимо считывания знаков обычного типографского шрифта и шрифта пишущей машинки, могут распознавать заглавные буквы и знаки препинания, а некоторые из них — также и знаки, написанные от руки печатным шрифтом. Система развертки в подобных ФЧА должна обеспечивать определение очертаний знака с малой зависимостью от формы его написания и размеров. Так, в ФЧА фирмы «Филко» (США) для определения местоположения и размеров знаков сначала осуществляется развертка с относительно большим шагом. По результатам этой развертки ФЧА автоматически приспособливается к развертке шрифта данной высоты, перестраивая растр. Полученные при развертке сигналы квантуются на два уровня и поступают в корреляционное устройство с 264-разрядным растром, который связан с эталонами, построенными на резисторах. Результаты сравнения опознаваемого знака с эталонами оцениваются на статистической основе. Количество необнаруженных ошибок не превышает 0,01%.

Фотоэлектрические следящие системы

Фотоэлектрическая следящая система (ФСС) осуществляет автоматическое отслеживание относительных перемещений объекта, расположенного в поле зрения системы и излучающего или отражающего электромагнитные волны (обычно в оптическом диапазоне).

Фотоэлектрические следящие системы применяются для считывания чертежей и графиков с последующей их передачей на расстояние или вводом в системы автоматического регулирования и ЭВМ (например, в программных задающих устройствах, в аналоговых вычислительных машинах для ввода нелинейных зависимостей, заданных графически, в системах обработки экспериментальных данных); при автоматизации различных технологических процессов; для управления различными объектами и механизмами (например, в системах ориентации и навигации летательных аппаратов, в системах поддержания взаимного положения объектов и заданного направления движения).

Фотоэлектрические следящие системы снабжаются фотоэлектрическими позиционно-чувствительными органами (ПЧО), которые создают электрические сигналы с параметрами (амплитудой, частотой, фазой и др.), соответствующими рассогласованию между оптической осью устройства и направлением на объект слежения. После усиления и преобразования эти сигналы управляют работой исполнительного органа, который смещает контролируемый объект или ПЧО в направлении уменьшения рассогласования.

В зависимости от числа координат оптической оси, которыми производится управление, различают одно- и двухкоординатные ФСС.

На рис. 20,а приведена схема типовой однокоординатной ФСС для программных задатчиков. На диаграммную ленту, перемещаемую синхронным двигателем M_1 , карандашом, тушью или чернилами наносится линия в виде зачерненной полосы, одна из кромок которой соответствует графику задаваемой программы. За этой кромкой следит подвижная фотоголовка, состоящая из фоторезистора ΦP и осветителя $ЛО$, установленных на специальной каретке. Фоторезистор включен в плечо моста, который уравновешен при затенении половины светочувствительной поверхности фоторезистора изображением программной линии. Диагональ моста подключена ко входу фазочувствительного усилителя, управляющего работой реверсивного электродвигателя M_2 . При смещении кромок линии относительно фоторезистора и движении ленты равновесие моста нарушается и двигатель M_2 перемещает фотоголовку в направлении уменьшения разбаланса моста, благодаря чему головка следует за кромкой линии. Одновременно двигатель M_2 воздействует на потенциометр $R_{вых}$ или другое выходное устройство, с которого снимается сигнал, пропорциональный ординате графика. Для изменения скорости перемещения ленты служит редуктор Pd со сменными шестернями либо питание двигателя M_1 осуществляется от генератора с регулируемой частотой [61].

Повышенная точность отслеживания достигается в ФСС с дифференциальными ПЧО (за счет увеличения чувствительности и снижения влияния внешних факторов).

На базе дифференциальных ПЧО строятся ФСС для программных устройств, в которых слежение осуществляется за тонко начерченной линией. В этом случае фотоголовка имеет два фотоэлемента,

которые следят за обеими кромками с небольшим перекрытием. При уходе программной линии от фотоэлементов, т. е. если они «видят» линию неодинаково, появляется сигнал рассогласования, включающий привод фотоголовки.

На рис. 20,б представлена принципиальная схема ФСС с дифференциальными ПЧО на двух вакуумных фотоэлементах. Источником света служит ртутно-кварцевая лампа L_0 , питаемая от сети переменного тока с частотой 50 Гц. За каждый период изменения сетевого напряжения лампа дает две вспышки, благодаря чему световые потоки, попадающие на фотоэлементы Φ_1 и Φ_2 , оказываются модулированными частотой 100 Гц. Если потоки, воспринимаемые фотоэлементами, не равны, то на сетке лампы L_1 появляется сигнал с частотой 100 Гц, амплитуда и фаза которого зависят от соотношения сравниваемых световых потоков. После усиления в усилителе переменного тока на лампах L_1-L_3 сигнал поступает на управляющую обмотку двухфазного реверсивного электродвигателя M . Вторая обмотка двигателя питается переменной составляющей (100 Гц) пульсирующего напряжения от двухполупериодного выпрямителя на лампе L_5 . Двигатель перемещает подвижный орган ФСС (например, фотоголовку) до выравнивания световых потоков на фотоэлементах и одновременно смещает движок выходного потенциометра $R_{вых}$.

В дифференциальных ПЧО часто используются дифференциальные, секторные, квадрантные фоторезисторы, квадрантные фотодиоды и т. п. [26].

Для уменьшения погрешностей ФСС, обусловленных различием характеристик фотоэлементов и неодинаковым их изменением во времени, в ПЧО может быть использован один фотоэлемент, на который поочередно направляются сравниваемые потоки излучения, например, с помощью вращающихся и колеблющихся зеркал и заслонок, электрооптических и магнитооптических ячеек и др., устанавливаемых перед фотоэлементом.

На рис. 20,в показана схема одного канала двухкоординатного ФСС с дифференциальными ПЧО на одном фотодиоде [50]. Если сравниваемые потоки равны, то в суммарном потоке, падающем на фотодиод $\Phi Д$, отсутствует переменная составляющая. При нарушении равенства потоков появляется переменная составляющая тока фотодиода, частота, амплитуда и фаза которой определяются соответственно частотой переключения (модуляции) сравниваемых потоков, величиной и знаком разности их значений. Ток фотодиода поступает в эмиттерный повторитель на транзисторе T_1 , согласующий высокоомный фотодиод с низким входным сопротивлением избирательного усилителя на транзисторах T_2-T_5 . Избирательные свойства усилителя обусловлены применением двойного Т-образного фильтра, настроенного на подавление частоты модуляции и включенного в цепь отрицательной обратной связи с выхода третьего каскада усилителя на вход первого каскада. Эмиттерный повторитель на транзисторе T_5 согласует выход избирательного усилителя с трансформаторным входом фазочувствительного усилителя на транзисторах T_6 и T_7 . В результате сопоставления фаз напряжения сигнала рассогласования и опорного напряжения $U_{оп}$ вырабатывается напряжение постоянного тока, которое после усиления в магнитном усилителе управляет приводом подвижного элемента ФСС.

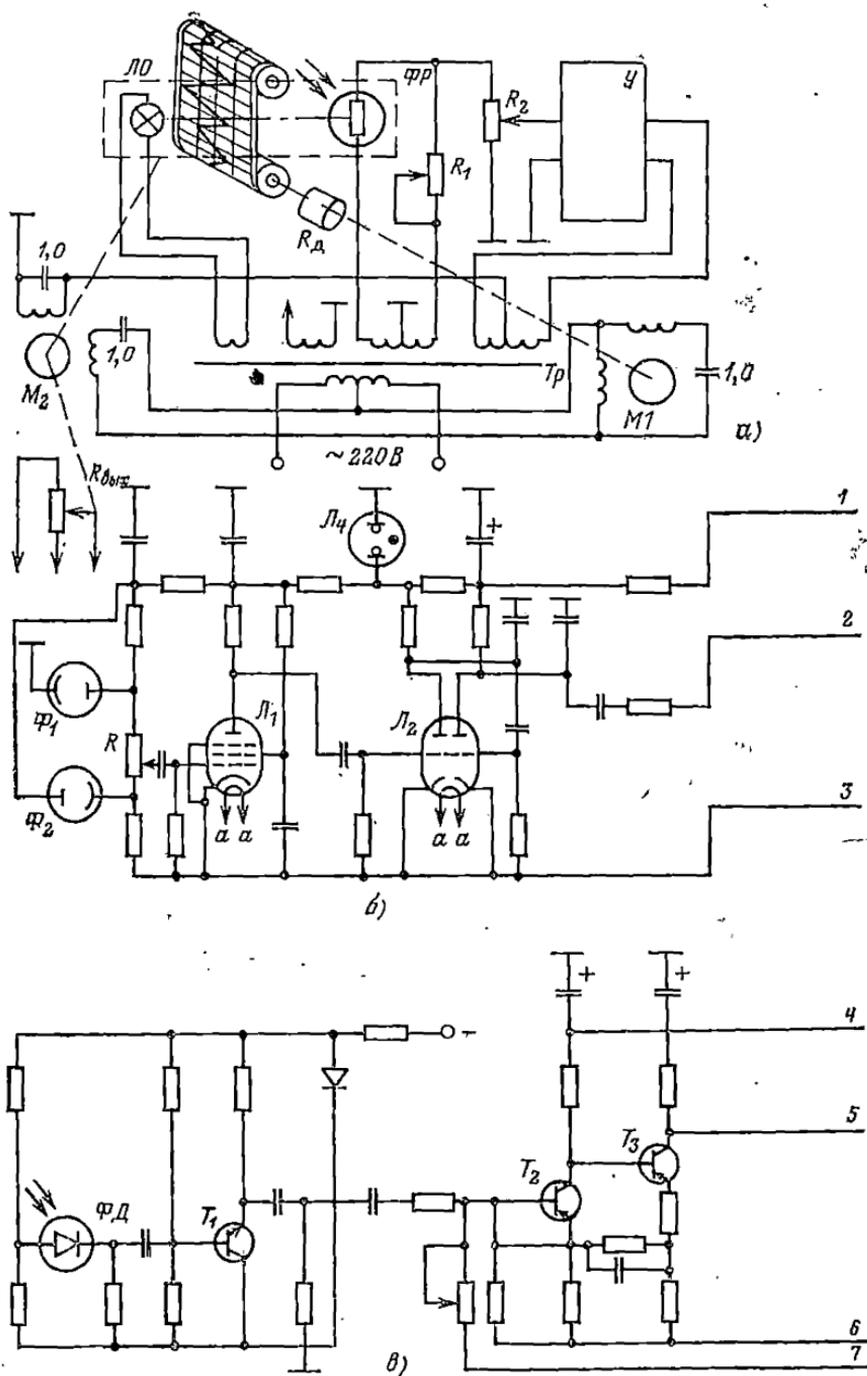
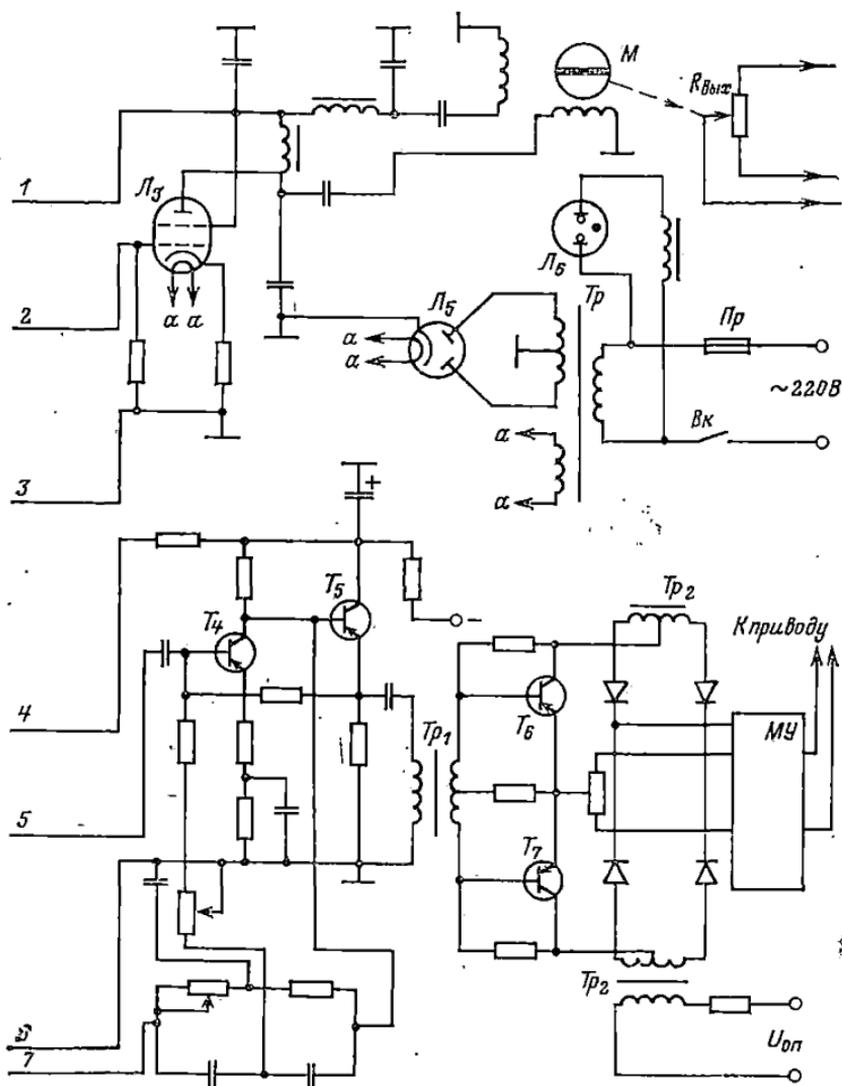


Рис. 20. Фотоэлектрические



следающие системы.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ФОТОРЕЛЕ

Фотореле геометрических размеров, положений и перемещений

Достоинствами фотореле геометрических размеров, положений, перемещений (ФГР) по сравнению с реле других типов аналогичного назначения являются возможность бесконтактных измерений, что особенно важно при контроле нагретых и перемещающихся с большими скоростями изделий, высокая точность (до десятых долей микрона), малая инерционность.

В ФГР используются свойства контролируемого объекта экранировать, поглощать, отражать, рассеивать, отклонять поток лучистой энергии (рис. 21).

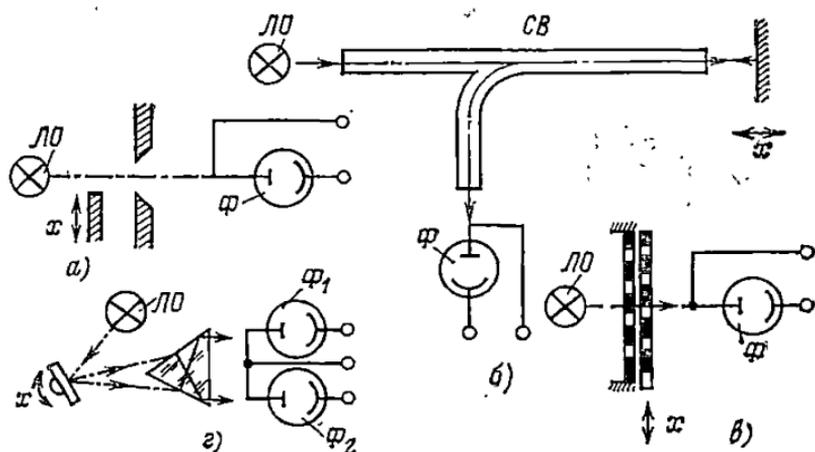


Рис. 21. Оптические схемы фотореле геометрических размеров и положений.

На световой поток, направленный на фотоэлемент, можно воздействовать непосредственно контролируемым объектом. Так, в ФГР по схеме рис. 21,а контролируемый объект в зависимости от размеров или положения затеняет большую или меньшую площадь светочувствительной поверхности фотоэлемента. В ФГР на рис. 21,б в зависимости от положения поверхности, перемещения которой относительно торца волоконнооптического световода СВ контролируются, большая или меньшая часть светового потока, прошедшего через одну из ветвей световода и отраженного от контролируемой поверхности, попадает через вторую ветвь световода на фотоэлемент [7].

Во многих случаях контролируемые размеры предварительно преобразуются в перемещения фотоэлемента, источника излучения, щорок, решеток (рис. 21,в), зеркал (рис. 21,з), призм полного внутреннего отражения или других элементов, установленных на пути светового потока к фотоэлементу.

В ряде ФГР для контроля толщин, разностенности и т. п. различных прозрачных и непрозрачных материалов используется зависимость ослабления оптического, рентгеновского или радиоактивного излучения от толщины слоя просвечиваемого материала.

Метод экранирования контролируемым объектом фотоэлемента используется в показанном на рис. 22,а ФГР для контроля поперечного сечения цилиндрических тел (например, для обнаружения утолщений в текстильной пряже) [11]. Свет от осветителя 14 проходит через диафрагму 13 и объектив 15, отражается от зеркала 4 и собирается в фокальной плоскости объектива 15 между трубками 2 и 7. Расстояние между трубками, ограничивающее поле измерения, при необходимости регулируется передвижением трубок в направлениях 3 и 6. Контролируемое тело (пряжа) 1, которое протягивается через трубки 2 и 7, попадая в поле измерения, экранирует часть светового потока, зависящую от поперечного сечения. Далее луч, отражаясь от зеркала 5, объективом 8 направляется

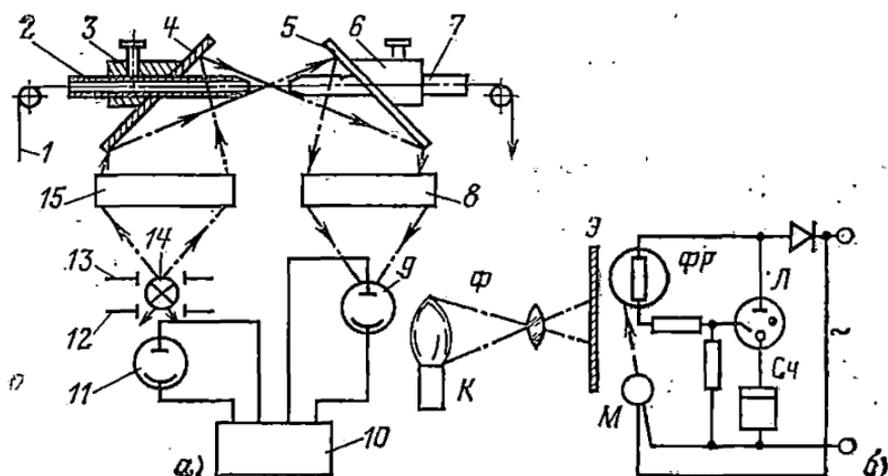


Рис. 22. Фотореле для контроля геометрических размеров.

на фотоэлемент 9. Для исключения влияния колебаний параметров осветителя на точность работы ФГР фотоэлемент 9 и фотоэлемент 11, на который через диафрагму 12 поступает часть светового потока осветителя 14, включены в мостовую схему 10.

В ФГР для контроля длин может использоваться зависимость времени затемнения фотоэлемента контролируемым объектом или его изображением, перемещающимся с определенной скоростью, от длины объекта.

На рис. 22,б показана схема ФГР для контроля размеров светящихся тел (например, высоты факела Φ над конвертором K), в котором перемещается не контролируемый объект, а фотоэлемент (фоторезистор ΦP) [49]. Тиратрон L питается пульсирующим напряжением с частотой 50 Гц, обеспечивающим поджигание только при засветке фоторезистора ΦP . Двигателем M фоторезистор перемещается возвратно-поступательно с постоянной скоростью вдоль экрана \mathcal{E} , на котором фокусируется изображение контролируемого

факела. При прохождении мимо засвеченного участка экрана сопротивление фоторезистора уменьшается и на счетчик S_i поступают импульсы, число которых за каждый цикл перемещения пропорционально длительности засветки фоторезистора, определяемой размерами факела (при постоянной частоте напряжения питающей сети). Общее число импульсов, зарегистрированных счетчиком, определяет интеграл высоты факела во времени.

В цифровых измерителях размеров и перемещений применяются ФГР, построенные по схемам, аналогичным показанной на рис. 21,б.

Одним из распространенных видов ФГР являются фотоэлектрические концевые выключатели (ФКВ), осуществляющие индикацию предельных положений.

Фотоэлектрические выключатели могут быть построены на базе любой из схем рис. 21 в сочетании с фоторелейными схемами, описанными в гл. 1.

В качестве примера на рис. 23 показана схема ФКВ для автоматической остановки лентопротяжного механизма магнитофона при обрыве ленты и окончании магнитофильма, а также в любом месте магнитофильма, отмеченном кусочком наклеенной отражающей фольги [4]. Фоторезистор ΦP и лампа осветителя $ЛО$ размещены в пластмассовом корпусе, который откидывается вверх при установке ленты $МЛ$ (при этом размыкаются контакты микровыключателя $Вк$). При обрыве ленты или при прохождении участка, отмеченного фольгой, свет, отраженный от

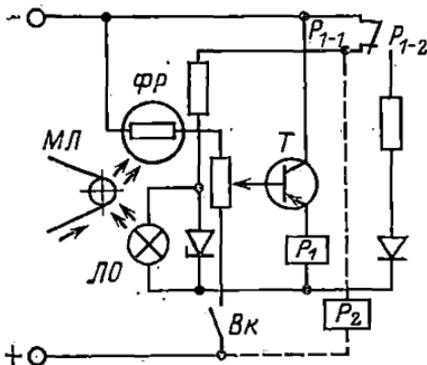


Рис. 23. Электрическая схема фотоэлектрического концевого выключателя.

направляющей колонки или фольги, уменьшает сопротивление фоторезистора, что приводит к открытию транзистора T и срабатыванию реле P_1 , контакты которого через промежуточное реле P_2 отключают питание двигателя лентопротяжного механизма.

Для повышения надежности ФКВ могут снабжаться резервными цепями. Так, в ФКВ на рис. 21,а, использующем на выходе реле с магнитоуправляемыми контактами, в качестве заслонки применен постоянный магнит, который в случае несрабатывания ФКВ при затенении фотоэлемента обеспечивает срабатывание путем непосредственного воздействия на магнитоуправляемые контакты выходного реле.

Фотореле угловых и линейных скоростей

Фотоэлектрические тахометры (ФЭТ) являются одним из наиболее совершенных средств контроля частоты вращения. Принцип их действия заключается в определении частоты пульсирующего тока фотоэлемента, освещаемого световым потоком, который модулируется вращающимся объектом измерения.

Модуляция светового потока, направляемого на фотозлемент ФЭТ, осуществляется при помощи вращающихся вместе с контролируемым объектом легких дисков с чередующимися прозрачными и непрозрачными участками зеркальных барабанов, элементов вращающегося объекта с созданными на их поверхности участками с различной отражательной способностью и т. п.

Частота пульсаций фототока f связана с частотой вращения ω вращающегося объекта соотношением

$$f = \frac{z}{2\pi} \omega,$$

где z — число прорезей или отверстий в диске, число граней в зеркальном барабане и т. п.

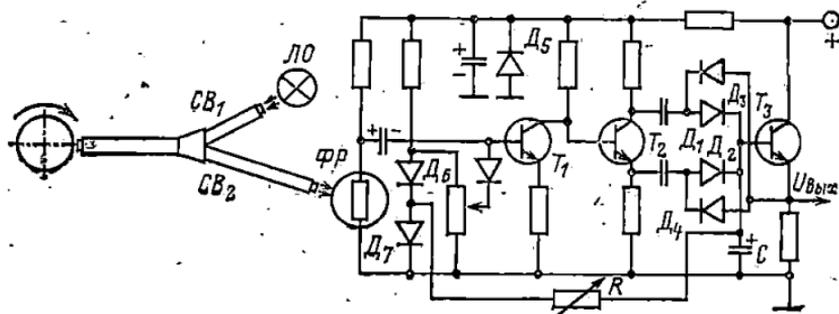


Рис. 24. Фотозлектрический тахометр.

Для измерения частоты в ФЭТ часто используются интегрирующие частотомеры, принцип действия которых заключается в измерении среднего значения тока $I_{ср}$ в цепи конденсатора емкостью C , перезаряжаемого с измеряемой частотой f в определенных границах разности потенциалов U . При этом имеет место зависимость

$$I_{ср} = kCUf,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

На рис. 24 приведена схема ФЭТ такого типа [86]. Свет от источника ЛО через световод СВ₁ направляется на вращающийся элемент контролируемого объекта, на поверхности которого нанесены метки, модулирующие световой поток. После отражения от вращающегося элемента свет по световоду СВ₂ попадает на фоторезистор ФР (использование световодов, например волоконнооптических, которые могут быть сделаны криволинейными, позволяет контролировать частоту вращения труднодоступных деталей). В усилителе-ограничителе на транзисторе Т₁ пульсирующий ток фоторезистора преобразуется в импульсы прямоугольной формы. Каждый такой импульс в фазоинверсном каскаде на транзисторе Т₂ преобразуется в два усиленных до одинаковой амплитуды и сдвинутых относительно друг друга на 180° прямоугольных импульса, которые выпрямляются диодами Д₁ и Д₂ и заряжают накопительный конденсатор С, подключенный к базе выходного усилительного транзистора Т₃.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ постоянного тока, пропорциональное измеряемой частоте вращения, поступает в индикатор и может быть также использовано для воздействия на пороговый элемент.

На базе ФЭР строятся простые и надежные приборы для контроля линейных скоростей. На рис. 25,а представлена схема одного из таких приборов, в котором скорость определяется по интервалу времени, в течение которого контролируемый объект перемещается на фиксированное расстояние. Фотодиоды $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$ двух ФЭР устанавливаются на некотором расстоянии l , скорость прохождения которого измеряется. При затемнении движущимся объектом фотодиода $\Phi Д_1$ реле P_1 выключается и его размыкающие контакты P_{1-1}

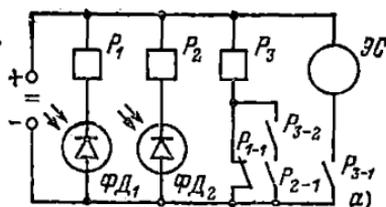
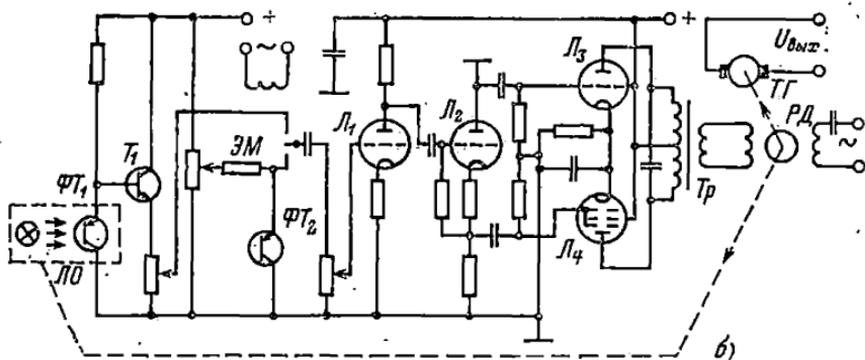


Рис. 25. Фотоэлектрические измерители линейных скоростей.



включают реле P_3 . Контакты P_{3-1} замыкаются и запускают электросекундомер $\mathcal{E}С$. После прохождения расстояния l объект затемняет фотодиод $\Phi Д_2$. Реле P_2 выключается, и его контакты P_{2-1} разрывают цепь питания реле P_3 . При отключении реле P_3 электросекундомер останавливается. Время t , отсчитанное электросекундомером, и скорость v движения объекта связаны соотношением $v=l/t$.

Вместо электросекундомера может использоваться счетчик.

Для непрерывных измерений скорости могут применяться ФСС, в которых скорость перемещения фотоголовок, следящих за положением контролируемого объекта, зависит от скорости их движения.

Так, в фотоэлектрической следящей системе на рис. 25,б выходным сигналом, пропорциональным скорости перемещения контролируемого объекта, является напряжение $U_{\text{вых}}$ тахогенератора $ТГ$, приводимого в действие реверсивным электродвигателем $РД$ фотоголовки [81]. Фотоголовка содержит осветитель $ЛО$ и фототранзистор $\Phi Т_1$. Ток фототранзистора $\Phi Т_1$ усиливается в предварительном усилителе постоянного тока на транзисторе $Т_1$ и усилителе переменного тока на лампах $Л_1—Л_4$, имеющем на входе элек-

троемеханический модулятор ЭМ. Для компенсации теплового дрейфа транзистора T_1 введен дополнительный фототранзистор $ФТ_2$ такого же типа, как и $ФТ_1$.

Для точного измерения линейной скорости при небольших перемещениях применяются фотоэлектрические устройства с оптическими решетками (см. рис. 21,б). Если одну решетку закрепить неподвижно, а вторую установить на объекте, скорость v которого измеряется, то на выходе фотоэлемента, освещаемого через обе решетки, возникает ток, пульсирующий с частотой $f=v/d$, где d — шаг решетки. Частота f измеряется одним из способов, рассмотренным ранее.

Фотореле ускорений

В испытательной технике при исследованиях и нормальной эксплуатации движущихся объектов (летательных аппаратов, автомобилей, деталей машин и станков) в системах автоматического управления параметрами движения возникает необходимость в контроле ускорений. Распространенным типом прибора для этих целей является акселерометр сейсмического типа, не требующий связи с неподвижной опорой. Такой акселерометр имеет инерционную (сейсмическую) массу, упруго прикрепленную к корпусу, которому сообщаются контролируемые ускорения. Свободные колебания массы гасятся демпфером. Перемещение x корпуса относительно массы M пропорционально ускорению ω [при $\omega < (3-4)\omega_0$]:

$$x = \frac{\omega}{\omega_0^2 \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{k_d}{\pi}\right)^2}}, \quad (23)$$

где $\omega_0 = \sqrt{C/M}$ — собственная частота колебаний системы; ω — частота вынужденных колебаний (при исследовании ускорений колебательных процессов); k_d — коэффициент демпфирования; C — жесткость упругой подвески. Таким образом, измерение ускорения сводится к измерению перемещения x .

Введение в подобные акселерометры фотоэлектрических устройств для контроля перемещений позволяет создавать простые, высокочувствительные фотореле ускорений (ФУ). Конструкции некоторых из них показаны на рис. 26. В ФУ для контроля линейных ускорений на рис. 26,а перемещение инерционной массы 7 на плоской стальной пружине 6, закрепленной в корпусе 1, преобразуется в электрический сигнал путем воздействий на световой поток от осветителя 3, направленный зеркалом 8, которым снабжена масса 7, на фотоэлементы 2 и 4, включенные по дифференциальной схеме [75]. Исходное положение массы, при котором освещенности фотоэлементов должны быть равны, а выходной сигнал отсутствует, устанавливается винтом 5. При такой конструкции смещение инерционной массы пропорционально составляющей ускорения, ориентированной по оси Y ; в направлениях, перпендикулярных этой оси, чувствительность акселерометра равна нулю.

Высокая чувствительность ФУ достигается при использовании преобразователей с оптическими решетками (см. рис. 21,б); одна

Из решеток связывается с корпусом акселерометра, а вторая — с инерционной массой.

Фотореле ускорений на рис. 26,б предназначено для контроля угловых ускорений. Угловое (вращательное) ускорение ω_ω вызывает поворот на угол φ свободно сидящей на вращающемся валу 1 инерционной массы в виде маховика 3 (маховик связан с валом пружиной 2). Зависимость величины φ от ω_ω определяется формулой, подобной (23). Вместе с маховиком смещается жестко связанный с ним диск 4 с прорезями относительно такого же диска 5, закрепленного на валу 1. При этом изменяется освещенность нескольких параллельно включенных вентильных фотоэлементов, которые благодаря секторной форме образуют сплошное кольцо.

В высокочувствительных ФУ, а также в ФУ для контроля по величине и направлению произвольно направленного вектора ускорения нашли применение акселерометры с бесконтактной подвеской инерционной массы в электростатическом или электромагнитном поле.

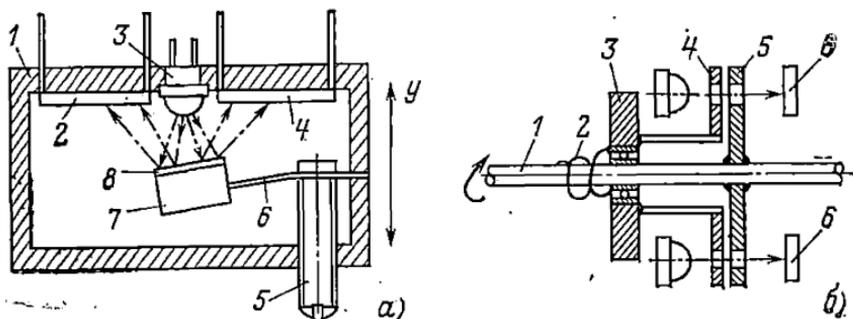


Рис. 26. Конструктивные схемы фотореле ускорений.

Принцип действия одной из разновидностей такого ФУ с электростатической подвеской состоит в следующем [78]. В герметическом корпусе, где для сведения к минимуму вязкого демпфирования откачан воздух, тремя взаимно перпендикулярными парами электродных пластин образовано кубическое пространство, в центре которого удерживается в равновесии электростатическими силами инерционная масса в виде заряженной до высокого потенциала и освещаемой лампой стеклянной бусинки. Отраженный от нее свет падает на два ПЧО, например, квадрантных фотоэлемента. При смещении бусинки под влиянием приложенного ускорения в произвольном направлении освещенность фотоэлементов изменяется так, что снимаемые с них сигналы пропорциональны составляющим вектора ускорения по трем осям и после усиления возбуждают электростатические силы, стремящиеся вернуть бусинку в исходное положение.

Чувствительность такого прибора достигает 100 В на 1g.

Для устранения нестабильности ФУ, связанной с изменением (уменьшением) статического заряда массы, последняя может быть снабжена источником β -лучей. В результате излучения инерционная масса получает возрастающий во времени отрицательный заряд.

Фотореле деформаций и механических напряжений

Приборы для контроля деформаций не должны влиять на нагруженность исследуемых объектов, должны быть легкими, небольшими по размерам и малоинерционными, чтобы следовать без запаздывания за быстро меняющимися нагрузками. Конструкция приборов должна обеспечивать быструю и надежную их установку на объекте. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют фотоэлектрические устройства.

На рис. 27,а показана оптическая схема фотореле деформаций (ФРД) для обнаружения отклонения от прямой линии в горизонтальной и вертикальной плоскостях [84]. Деформация контролируемого объекта 2 приводит к нарушению соотношений освещенностей фотоэлементов 4 и 5, на один из которых луч модулированного света от источника 1 направляется непосредственно, а на второй — от того же источника, но через несколько диафрагм 3, закрепленных в выбранных точках объекта.

Фотоэлементы включаются в дифференциальную схему, например, подобную схеме на рис. 6,г.

Для преобразования деформаций в изменение освещенности фотоэлементов наряду с диафрагмами используются оптические клинья, заслонки, поворотные зеркала и другие элементы, связываемые с объектом, деформация которого контролируется.

Чувствительность, достигающая долей микрона, обеспечивается в ФРД с оптическими решетками. Схема одного из них, предназначенного для контроля деформаций при исследовании ползучести металлических проволок, приведена на рис. 27,б [41]. Луч света от осветителя 1 через линзу 2, решетку 3 с чередующимися прозрачными и непрозрачными полосами и линзу 4 направляется на зеркало 5. Отразившись от зеркала и снова пройдя через линзу 4, лучи дают изображение решетки в плоскости щели 6 фотоэлемента 7. При удлинении образца под действием груза острие, связанное с грузом, давит на рычажок зеркала 5 и вызывает его поворот. Если ширина щели равна ширине изображения одной полосы решетки, то при повороте зеркала в щель будут попадать попеременно светлые и темные полосы изображения решетки. Количество импульсов фототока, возникающих при этом и регистрируемых счетчиком, является мерой деформации.

По величинам упругих деформаций, определяемым описанными средствами, могут контролироваться механические напряжения (на-

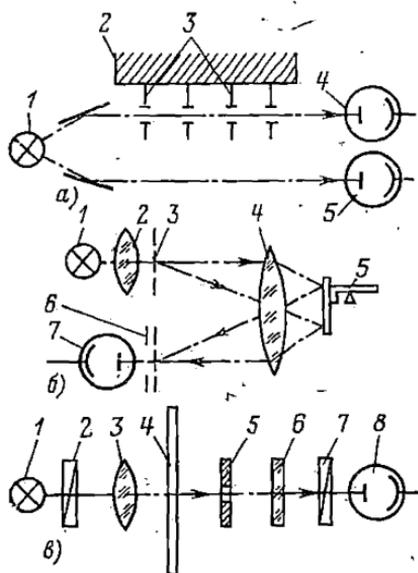


Рис. 27. Оптические схемы фотореле деформаций и механических напряжений.

пряжения σ и относительная деформация ε связаны известным соотношением $\sigma = \varepsilon E$, где E — модуль упругости материала).

Перспективными являются фотореле напряжений (ФРН), использующие явление двойного лучепреломления в изотропной прозрачной среде под действием напряжений (явление фотоупругости). Обнаружение напряжений и контроль их величины осуществляются в таких ФРН по изменению интенсивности и спектрального состава поляризованного светового излучения при прохождении через контролируемый объект, выполненный из оптически активного материала.

Оптическая схема подобного ФРН для обнаружения напряжений в изделиях из прозрачных материалов представлена на рис. 27, в [72]. Световое излучение от источника 1 горизонтально поляризуется поляроидом (поляризатором) 2 и конденсором 3 фокусируется на поверхности исследуемого объекта 4. Часть света, прошедшая через объект, через диафрагму 5 направляется на интерференционный фильтр 6, который изменяет соотношение интенсивностей спектральных составляющих света, а затем на поляроид (анализатор) 7. Последний ориентируется так, чтобы гасилось излучение, прошедшее через ненапряженные участки исследуемого объекта. Если же объект напряжен, то часть светового потока проходит через анализатор и попадает на фотоэлемент 8. Фототок зависит от интенсивности и спектрального состава падающего на фотоэлемент светового потока, несущего информацию о характере и величине напряжений.

Такие ФРН, обладающие чувствительностью, на порядок более высокой, чем тензорезисторные устройства, позволяют контролировать распределение напряжений в прозрачных моделях (из эпоксидных, полиэфирных и других смол) при нагрузках, имитирующих нагружение моделируемой детали.

Фотореле сил

Фотоэлектрические устройства для контроля сил (ФРС), отличающиеся высокой чувствительностью, малой инерционностью и большим сроком службы, применяются при исследованиях силовой нагруженности различных приборов и машин, при усталостных испытаниях материалов и элементов конструкций, в процессе которых производится многократное приложение нагрузок с большой частотой, при испытаниях на удар и т. п.

Распространенной разновидностью ФРС являются устройства, использующие явление фотоупругости. В таких ФРС (рис. 28, а) используется зависимость светового потока, прошедшего через систему из двух скрещенных поляроидов (поляризатора 6 и анализатора 9 с плоскостями поляризации, составляющими угол 90°) и помещенного между ними двудушепреломляющего силоизмерительного элемента 8, от пропорциональной приложенной силе P оптической разности хода двух лучей, на которые расщепляется световой поток в элементе 8 и которые распространяются с различными скоростями. Свет от осветителя 1 проходит через конденсор 2, светофильтр 3, спектрально-нейтральный клин 4 и попадает на полупрозрачное зеркало 5. Часть светового потока, прошедшая через зеркало, через поляризатор 6, элемент 8, анализатор 9 направляется на измерительный вентильный фотоэлемент 10. Световой поток, отраженный от зеркала 5, проходит спектрально-нейтральный клин 13 и попадает на компенсационный вентильный фотоэлемент 12, который

с фотоэлементом 10 непосредственно или после предварительного усиления подключается к измерительному прибору (например, гальванометру) 11, к исполнительным органам систем контроля, управления, защиты и т. п.

Если угол между осью оптической системы и оптической осью элемента 8 равен 90° , а углы, составленные плоскостями поляризации анализатора и поляризатора с оптической осью элемента 8, равны по 45° , то между контролируемой силой P и световым потоком Φ , падающим на фотоэлемент, существует зависимость

$$\Phi = k\Phi_0 \sin^2 \frac{\pi(\delta_0 + cP)}{\lambda},$$

где Φ_0 — световой поток, падающий на поляризатор; λ — длина волны света, пропускаемого фильтром 3; k — коэффициент пропуска-

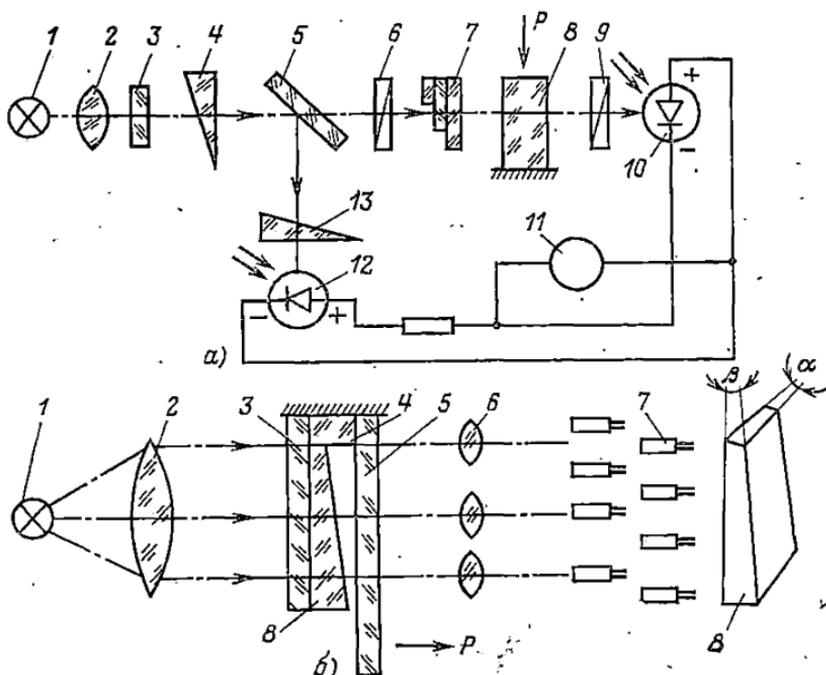


Рис. 28. Фотоэлектрические устройства для контроля сил.

ния поляризатора и анализатора; c — коэффициент фотоупругости материала элемента 8; δ_0 — дополнительная разность хода лучей, обусловленная введением слюдяной пластинки 7 для получения приблизительно линейной зависимости между потоком Φ и силой P в диапазоне измерений.

Чувствительность, пределы измерения и жесткость устройства могут варьироваться в широких пределах путем изменения коэффициента фотоупругости, модуля упругости и размеров элемента 8, яркости источников света, положения клина 4, определяющего величину Φ_0 , за счет выбора фотоэлементов и исполнительных органов. Точность таких ФРС достигает 0,1%.

На рис. 28,б приведена схема ФРС, использующего интерференционный метод и обеспечивающего цифровой отсчет контролируемой силы [83]. Для получения интерференционной картины (полос равной ширины) используется система, содержащая плоскопараллельные пластины 3—5 из кварца и клинообразную пластину 8 также из кварца, которые освещаются параллельным пучком монохроматического света, направляемым от источника 1 через конденсор 2. Контролируемая сила P прикладывается к пластине 5, работающей на изгиб. Между свободной поверхностью пластины 8 и обращенной к ней поверхностью пластины 5 образуется воздушный клин, перпендикулярный при $P=0$ направлению распространения пучка, в котором формируются интерференционные полосы. Приложение нагрузки приводит к изменению положения интерференционных полос, что регистрируется фотоэлектрической системой, состоящей из нескольких определенных образом размещенных фотоэлементов 7, на которые оптической системой 6 проецируются изображения полос.

Фотоэлектрические устройства для контроля сил могут также строиться на базе упругих силоизмерительных элементов, деформация которых, пропорциональная приложенной силе, преобразуется в электрический сигнал с помощью ФЭР.

Фотореле массы

Применение ФЭР в массоизмерительной технике позволяет автоматизировать процесс взвешивания и создавать быстродействующие чувствительные и точные приборы для регистрации и дистанционной передачи результатов взвешивания, автоматизации производственных процессов.

Одной из основных задач, решаемых фотореле массы (ФРМ), является обнаружение и контроль отклонения весов от положения равновесия.

На рис. 29,а приведена электрическая схема ФРМ, выполненного в виде приставки к весам с ручным уравниванием [70]. Под действием контролируемой массы коромысло весов деформируется (или перемещается) и смещение связанной с ним заслонки из алюминиевой фольги приводит к изменению освещенности фоторезистора ФР (типа ФСК-1), подсвечиваемого лампой накаливания. Подбором конфигурации заслонки для используемого упругого элемента обеспечивается пропорциональность между измеряемой массой и сопротивлением фоторезистора. Ток фоторезистора усиливается усилителем постоянного тока на транзисторах $T_1—T_3$, на выходе которого включен индикатор равновесия (миллиамперметр mA). Переключатель Π служит для установки одного из трех диапазонов измерения. Подобные устройства позволяют взвешивать на аналитических весах с точностью до тысячных долей миллиграмма.

На рис. 29,б представлена электрическая схема ФРМ для автоматического уравнивания торсионных весов типов ВТ-500, ТВ-200 и др. [3]. Система индикации отклонения весов от положения равновесия содержит фоторезисторы ΦP_1 и ΦP_2 и осветительную лампу L , укрепленные на корпусе весов так, что перемещение коромысла меняет освещенность фоторезисторов. Сигнал от фоторезисторов поступает на усилитель на транзисторах $T_3—T_7$, нагруженный обмоткой ω_1 реверсивного двухфазного двигателя M (типа ДИД-05). Обмотка ω_2 двигателя, а также фоторезисторы

питаются от преобразователя постоянного тока в переменный с частотой 400 Гц на транзисторах T_1 и T_2 . Через редуктор двигатель вращает ось торсионного волоска весов, создавая компенсирующий момент, который возвращает коромысло в нулевое положение. К оси волоска прикреплен движок реохорда R , подающего напряжение, пропорциональное углу поворота оси, на вход регистрирующего

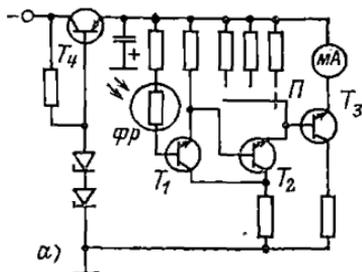
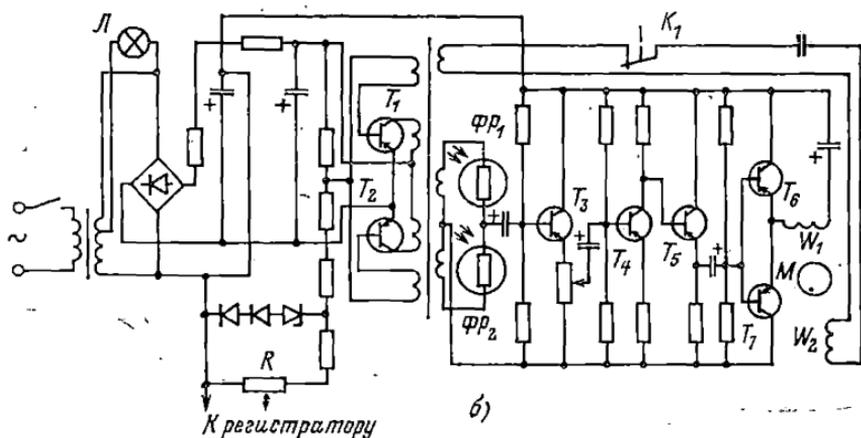


Рис. 29. Фотореле для измерителей массы.



прибора. На концах реохорда установлены выключатели K_1 , отключающие питание двигателя M в случаях, когда не удается уравновесить весы в диапазоне шкалы. Точность измерений $\pm 0,5\%$.

Введение в циферблатные и другие типы весов СКУ позволяет получать информацию о достижении заданных значений массы для систем автоматического контроля и управления процессами дозировки и упаковки материалов, разбраковки и сортировки изделий по массе и т. п.

Фотореле давлений

Использование фотоэлектрических преобразователей позволяет на базе жидкостных и мембранных манометров, манометров с сильфонами, трубчатыми пружинами и т. п. создавать простые и надежные устройства — фотореле давления (ФРДВ) — для дистанционного контроля, регистрации, сигнализации, автоматического регулирования давления жидкостей и газов.

В ФРДВ на базе жидкостных манометров, где контролируемое давление определяется по уровню жидкости в стеклянной трубке, столб жидкости (обычно ртути) при изменении давления (например, при увеличении выше нормы) перекрывает световой поток от осветителя 1 (рис. 30,а), направляемый линзами 2 и 4 через диафрагму 3 и фотозлемент 5. Получаемый при этом сигнал можно использовать как для включения сигнальных или управляющих устройств, так и для измерения (аналогового или цифрового) давления. В аналоговых измерителях применяются системы слежения за уровнем жидкости в трубке, подобные показанным на рис. 20. В цифровых измерителях содержатся дополнительные устройства для преобразования высоты столба жидкости (или разности уровней жидкости в плечах V-образной трубки) в цифровой код [23].

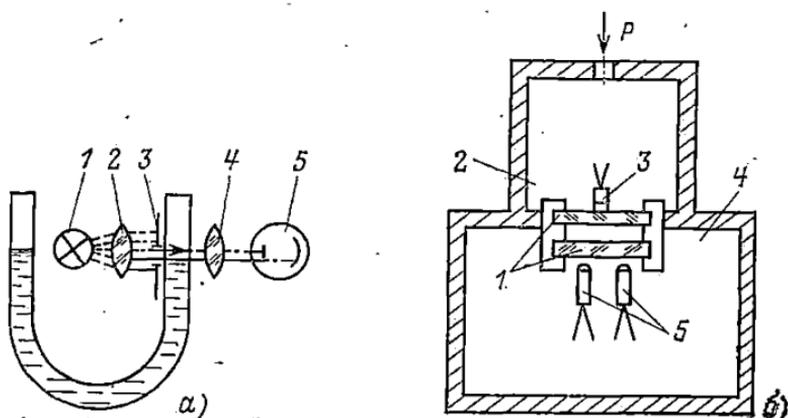


Рис. 30. Конструктивные схемы фотореле давлений.

В ФРДВ на базе манометров с сифонами и трубчатыми пружинами деформации пружин под действием контролируемого давления используется для управления освещенностью фотозлементов.

Принципы построения ФРДВ с мембранными манометрическими элементами могут быть проиллюстрированы на примере устройства для контроля давления в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания. Полированная металлическая мембрана, установленная в головке цилиндра, под действием давления прогибается, и параллельный пучок света после отражения от нее становится расходящимся. Освещенность фотозлемента, воспринимающего отраженный свет, при этом уменьшается, что фиксируется по изменению фототока.

Высокая чувствительность достигается в мембранных ФРДВ, где для контроля прогиба мембраны используются оптические схемы, аналогичные показанной на рис. 21,б.

На рис. 30,б схематически изображена конструкция мембранного ФРДВ для измерения (с цифровым отсчетом) малых изменений значительных давлений [80]. Мембрана в виде двух тонких стеклянных дисков 1, разделенных малым зазором, установлена между измерительной камерой 2 и камерой эталонного давления 4.

Камеры заполнены силиконовым маслом, имеющим контакт с зазором между дисками 1. При прохождении когерентного луча от светодиода 3 между дисками создается интерференционная картина (кольца Ньютона), обусловленная разностью оптических путей падающего и отраженного лучей. При прогибе верхнего диска под действием контролируемого давления происходит радиальное смещение колец, и фотодиоды 5 оказываются попеременно то в световой, то в темной зонах, а их фототоки являются периодической функцией разности расстояний между дисками и, следовательно, функцией давления. Фотодиоды подключены к реверсивному счетчику. Количество импульсов тока каждого из фотодиодов и соотношение фаз сигналов двух фотодиодов определяют соответственно величину и знак изменения контролируемого давления. Порог чувствительности ФРДВ $0,07 \text{ Н/см}^2$.

Для контроля давления паров строятся ФРДВ, в которых используются чувствительные элементы в виде прозрачных тел, например стержней, с пористой поверхностью, где свет испытывает многократное отражение, зависящее от контролируемого давления [82].

Фотореле уровня жидких и сыпучих тел

В фотореле уровня (ФРУ) отсутствует непосредственный контакт с контролируемой средой, что весьма важно при контроле уровней агрессивных, взрывоопасных, вязких, нагретых, стерильных сред. Простота, надежность, удобство монтажа и эксплуатации обусловили относительно широкое применение ФРУ также и в случаях, когда отсутствие контакта с контролируемой средой не имеет принципиального значения.

В ФРУ используются явления поглощения, преломления, фокусирования, отражения, поляризации, рассеивания лучистой энергии средой, уровень которой контролируется (рис. 31).

На рис. 31,а показана оптическая схема ФРУ непрозрачных и темноокрашенных сред, состоящего из осветителя ЛО, конденсорной и фокусирующей линз ЛК и ЛФ и фотоэлемента Ф. Импульс фототока для приведения в действие исполнительного органа ФРУ создается при прерывании или ослаблении средой светового потока, направленного на фотоэлемент. Фотореле уровня устанавливается либо непосредственно на резервуаре, уровень среды в котором контролируется, либо на сообщающейся с резервуаром стеклянной трубке Т (например, на водомерном стекле).

Для контроля уровня темноокрашенных жидкостей в резервуарах с непрозрачными стенками осветитель и фотоэлемент устанавливаются вне резервуара у входных торцов волоконнооптических световодов. Выходные торцы световодов осветителя и фотоэлемента располагаются соосно с небольшим зазором над контролируемой жидкостью на уровне срабатывания ФРУ.

Уровень слабоокрашенных жидкостей может контролироваться ФРУ, использующим зависимость поглощения света от толщины слоя жидкости, уровень которой контролируется.

При контроле уровня прозрачных жидкостей, слабо поглощающих свет, применяются ФРУ, в которых управляющий импульс фототока возникает при пересечении непрозрачным поплавком светового потока, направленного на фотоэлемент, либо ФРУ, в кото-

рых используются преломляющие или фокусирующие свойства стеклянной трубки, наполненной жидкостью.

В ФРУ на рис. 31,б используются преломляющие свойства трубки с жидкостью. Луч света, проходящий через трубку по хорде ее сечения, при отсутствии жидкости практически не меняет своего направления (пунктирная линия). Если же на уровне установки фотоэлемента трубка заполнена жидкостью, то луч отклоняется от своего первоначального направления и попадает на фотоэлемент Φ (сплошная линия).

В ФРУ при достижении жидкостью уровня срабатывания может обеспечиваться увеличение освещенности фотоэлемента за счет фокусирующих свойств наполненной жидкостью стеклянной трубки, которую можно рассматривать как цилиндрическую линзу (пустая стеклянная трубка этим свойством не обладает).

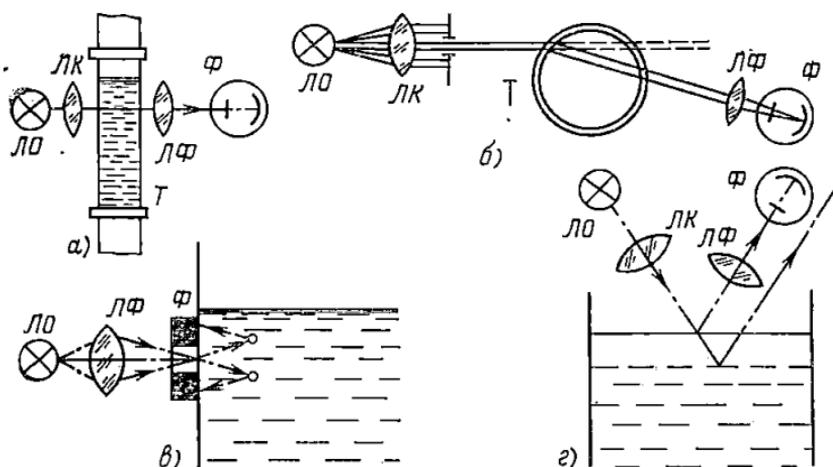


Рис. 31. Оптические схемы фотореле уровня.

Фотореле уровня на рис. 31,в предназначено для контроля уровня мутных жидкостей. Свет от осветителя $ЛО$ направляется в резервуар с контролируемым уровнем через центральное отверстие фоторезистора Φ (типа ФС-К6). Если уровень жидкости ниже уровня установки фоторезистора, то свет проходит через резервуар и не попадает на фоторезистор. При повышении уровня в резервуаре свет рассеивается в мутной жидкости и, частично отражаясь от взвешенных частиц, засвечивает фоторезистор.

Для контроля уровней различных сред (жидких и твердых, прозрачных и непрозрачных) применяются ФРУ, в которых используется зависимость от уровня условий отражения света от поверхности среды (рис. 31,г), стенок резервуара или специальных оптических элементов.

В ФРУ сильно нагретых сред (например, раскаленных металлов), являющихся источником видимого или инфракрасного излучения, может использоваться различие в светимости стенок резервуара и поверхности нагретой среды,

Фотореле скорости и расхода вещества

Фотореле скорости и расхода вещества (ФРР), отличающиеся быстродействием, широким диапазоном измерений, отсутствием непосредственного контакта с контролируемой средой, позволяют измерять, регистрировать и регулировать с высокой точностью расходы (массовые и объемные) и скорости постоянных и быстроменяющихся потоков жидких, газообразных и сыпучих сред. Такие фотореле весьма разнообразны по принципу действия.

На рис. 32 показана схема простого ФРР, основанного на автоматическом определении длительности наполнения (или опорожнения) фиксированного объема, для проверки счетчиков и расходомеров газа [46]. Поток газа, отсасываемый вентилятором $Вн$, проходит через поверяемый прибор $ПП$ и калиброванную трубку $Т$. Для съема показаний прибора $ПП$ используется фотоэлектрическое счетное устройство, содержащее обтюратор $Об$, устанавливаемый на роторе прибора $ПП$, и неподвижные фотодиод $ФД_1$ и осветитель $ЛО_1$. При достижении прибором установившегося режима работы

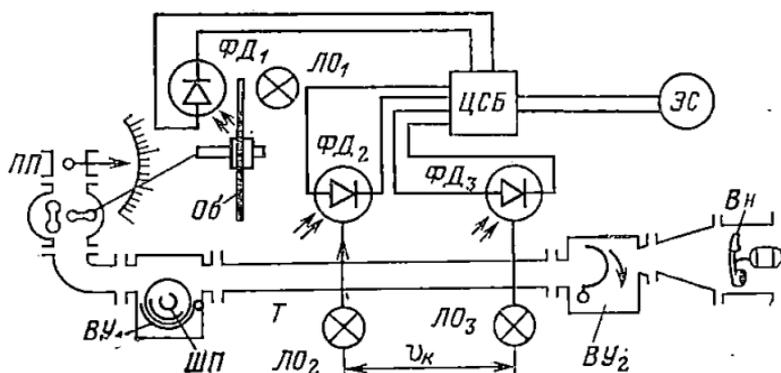


Рис. 32. Фотореле расхода, основанное на контроле продолжительности наполнения или опорожнения фиксированного объема.

пусковым устройством $ВУ_1$ в поток газа вводится легкий полиэтиленовый шарообразный поршень $ШП$. Двигаясь в трубе $Т$, поршень последовательно проходит мимо фотодиодов $ФД_2$ и $ФД_3$, вытесняя газ. При прохождении мимо фотодиода $ФД_2$ включается цифровой счетный блок $ЦСБ$ и начинается съем показаний прибора; при прохождении мимо фотодиода $ФД_3$ отсчет прекращается, после чего поршень устройством $ВУ_2$ выводится из потока. Погрешность поверяемого прибора определяется сопоставлением показаний прибора $ПП$ со значением контролируемого объема газа v_k , вытесненного поршнем из трубы. При проверке расходомеров к блоку $ЦСБ$ дополнительно подключается электросекундомер, $ЭС$ для измерения времени, затрачиваемого на вытеснение объема v_k .

Для непрерывного контроля расходов и скоростей прозрачных жидкостей и газов применяются ФРР, близкие по принципу действия к показанному на рис. 32, для которых создаются оптически непрозрачные метки из какого-либо порошка, периодически вводимого в поток специальными дозаторами [41, 46]. Фотоэлектрическое

устройство определяет время прохождения метки вместе с потоком между двумя сечениями трубопровода. Недостатком систем с оптическими метками является некоторое загрязнение контролируемого потока.

Для контроля мгновенных значений расхода и скорости потока жидкости или газа применяются ФРР на базе турбинных расходомеров [41, 79]. Принцип их действия основан на зависимости частоты вращения крыльчатки, помещенной в контролируемый поток, от скорости потока, а следовательно, и от расхода.

На рис. 33 схематически показано устройство турбинного ФРР для прозрачных жидкостей и газов с аксиальной крыльчаткой 1, которая при вращении под действием контролируемого потока пересекает своими лопастями световой луч, идущий через прозрачные окна 4, от осветителя 2 на фотозлемент 3. При этом возникает фототок, пульсирующий с частотой $f=nm$, где n — число оборотов крыльчатки в секунду, m — число лопастей крыльчатки. Переменная составляющая фототока поступает в счетное устройство, аналогичное описанному на с. 27 (при определении прошедшего через трубопровод количества жидкости или газа), либо измеритель частоты, аналогичный описанному на с. 46—49 (при контроле мгновенных значений расхода и скорости).

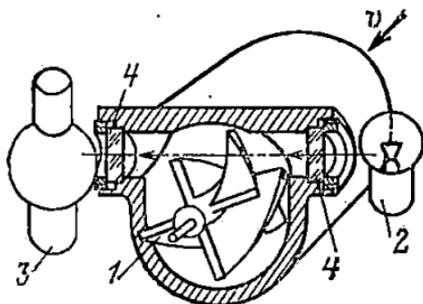


Рис. 33. Конструкции турбинных фотореле расхода и скоростей потока.

В турбинных ФРР с тангенциальной крыльчаткой в отличие от ФРР с аксиальной крыльчаткой направление движения крыльчатки совпадает с направлением потока, благодаря чему отсутствует осевая составляющая давления на подшипники крыльчатки и уменьшается механическое трение.

Фотореле концентрации растворов и дисперсных сред

Фотореле, реагирующие на концентрацию тех или иных компонентов в растворах или дисперсных средах (ФРК), по сравнению со многими другими распространенными средствами количественного анализа, в частности приборами для весового и объемного методов анализа, оптическими (визуальными) колориметрами, рефрактометрами и др., обладают такими достоинствами, как объективность и непрерывность контроля, высокие чувствительность и точность, возможность использования в системах автоматизации разнообразных производственных процессов и научных исследований.

ФРК на базе плотномеров. В ФРК, использующих зависимость плотности растворов и дисперсных систем типа суспензий от контролируемой концентрации, могут применяться поплавковые, массовые, гидростатические и другие типы плотномеров.

На рис. 34,а показано ФРК для жидких сред, в котором контролируемая концентрация, определяющая плотность жидкости с помощью поплавка 4 преобразуется в перемещение экрана 5

изменяющего освещенность фоторезистора 6 [16]. Контролируемая жидкость поступает в измерительный сосуд 1 через трубку 8. Для обеспечения постоянства уровня в сосуде жидкость сливается через окна верхней части в наружную камеру 3, откуда удаляется через трубу 7. Поплавок перемещается в направляющем цилиндре 2, смонтированном по центру сосуда.

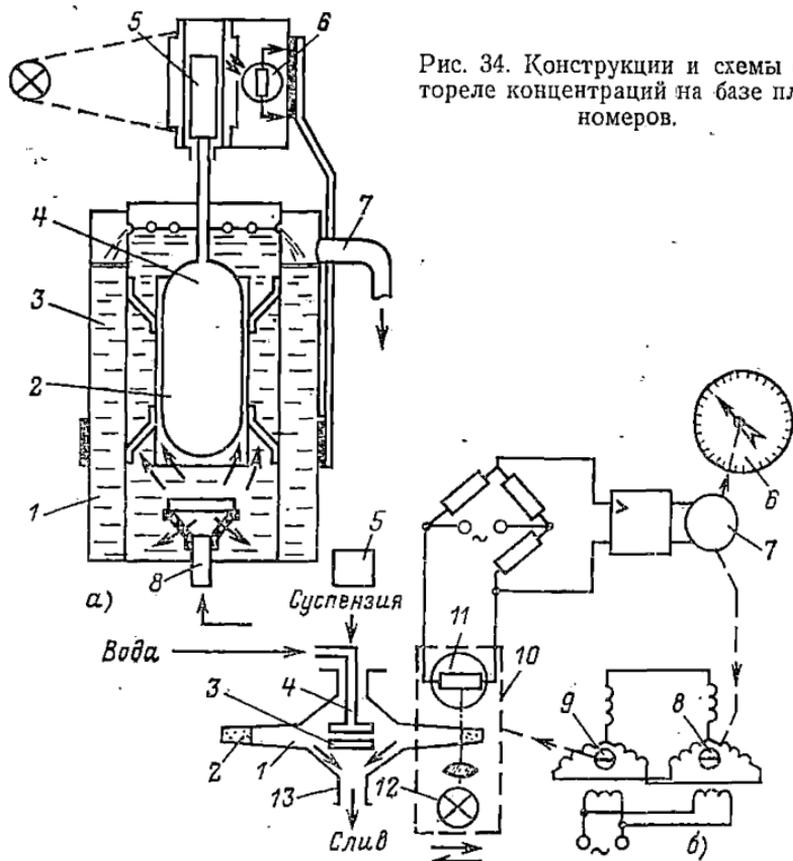


Рис. 34. Конструкции и схемы фотореле концентраций на базе плотномеров.

На рис. 34,б приведена схема ФРК непрерывно-циклического действия для контроля концентрации твердых частиц определенных размеров в суспензиях [32]. Центробежное силовое поле воздействует на определенный объем контролируемой суспензии с целью отделения дисперсной среды от жидкости, причем выделение необходимого диапазона размеров частиц осуществляется выбором времени центрифугирования. Ротор 1 центрифуги содержит два одинаковых по объему наконечника 2, заполняемых суспензией, поступающей из дозатора 5 через верхнее отверстие вращающегося ротора. Диск 3 препятствует вытеканию суспензии во время вращения центрифуги. После окончания центрифугирования жидкость самотеком удаляется из наконечников через патрубок 13. Толщина осадка в наконечниках 2, являющаяся мерой концентрации частиц заданного интервала размеров, измеряется фотоэлектрической си-

стемой с подвижной головкой 10, следящей за положением границы осадка в наконечнике 2 (головка выполнена на базе фоторезистора 11, освещаемого лампочкой 12 через продольную прорезь наконечника). Реверсивный двигатель 7 следящей системы, размещенный в корпусе отсчетного устройства, воздействует на удаленную от него подвижную головку через электрическую дистанционную передачу на базе сельсина-датчика 8 и сельсина-приемника 9 и одновременно перемещает стрелку указателя 6. После окончания замера включается промывочное устройство 4 для удаления осадка из наконечников; затем цикл повторяется.

Фотореле концентрации растворов на базе массовых плотномеров, действие которых основано на непрерывном взвешивании неизменного объема контролируемой жидкости, протекающей по трубопроводу, строятся по тем же принципам, что и фотореле массы.

Колориметрические ФРК (ФРКК). Колориметрические методы предусматривают определение концентрации растворов по интенсивности их окраски, обусловленной либо непосредственно контролируемым растворенным веществом, либо введением специфических для него реактивов (индикаторов). В фотоэлектрической колориметрии интенсивность окраски растворов определяется путем измерения поглощения светового излучения (монохроматического или полихроматического) в исследуемом растворе.

Между концентрацией C растворенного вещества и интенсивностью поглощения монохроматического или постоянного по спектральному составу полихроматического светового потока существует зависимость

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon_\lambda l C}, \quad (24)$$

где Φ_0 и Φ — соответственно световые потоки до и после поглощения в слое раствора толщиной l ; ϵ_λ — коэффициент, зависящий от длины волны λ излучения, в котором проводится измерение, от природы растворенного вещества и температуры раствора.

Колориметрические измерения обычно проводятся в областях спектра, для которых поглощение в исследуемом растворе максимально. С этой целью применяют светофильтры, задерживающие большую часть лучей, не поглощаемых раствором, а также выбирают фотоэлементы с соответствующей спектральной характеристикой.

Одноканальные ФРКК с прямым преобразованием используются в титраторе на рис. 35 [71]. Титрование является методом количественного анализа, заключающимся в измерении объема прореагировавших растворов и проводимым обычно в присутствии индикатора, который изменением окраски в растворе указывает на прекращение той или иной химической реакции.

Фотоэлектрическое реле на фотодиоде ФД, реагирующее на изменение окраски титруемого раствора, позволяет точно фиксировать момент окончания титрования (в зависимости от вида реакции установкой переключателя П обеспечивается срабатывание ФЭР при окрашивании или обесцвечивании раствора). При срабатывании ФЭР его исполнительное реле P_1 , подключенное к выходу усилителя фототока на транзисторах T_1-T_3 , включает сигнальную лампу L_1 , останавливает электропривод M_1 мешалки, перемешивающей раствор в процессе титрования для достижения равномерной окраски по всему объему, и с помощью электромагнита ЭМ₁ пере-

крывает кран бюретки, из которой в раствор поступает титрант. По шкале бюретки отсчитывается количество израсходованного титранта, являющееся мерой определяемой концентрации.

Повышенная точность работы достигается в ФРКК с уравнивающим преобразованием, где в отличие от рассмотренного ФРКК с прямым преобразованием может быть сведено к минимуму влияние температуры окружающей среды, колебаний напряжения питания и внешней освещенности, погрешности выходных (индикаторных) устройств. Принцип действия подобных ФРКК основан на электрической или оптической компенсации контролируемой величины (непосредственно или после предварительного преобразования). Показания отсчитываются по шкале компенсирующего воздействия. Выходное устройство при этом выполняет роль нуля-индикатора, и требования к нему менее жестки, чем в случае прямого преобразования.

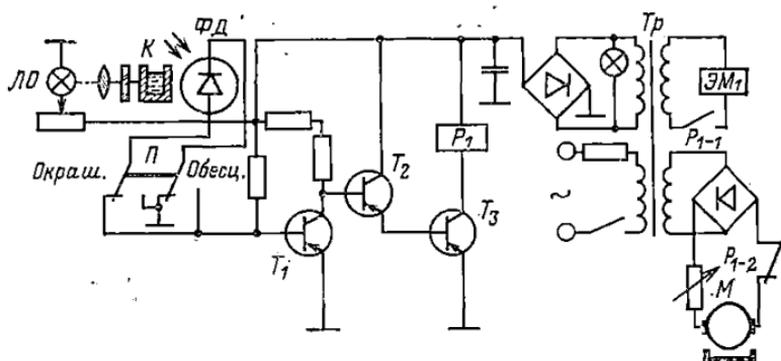


Рис. 35. Колориметрическое фотореле с прямым преобразованием.

Примером ФРКК с уравнивающим преобразованием является анализатор жидкости типа ЛИАЖ (рис. 36,а) [9]. В нем лучистый поток от излучателя ЛО отражателем O_1 направляется по двум каналам — измерительному и сравнительному. В измерительном канале установлен светофильтр $СФ_1$ на длину волны $\lambda_{изм}$, а в сравнительном канале — светофильтр $СФ_2$ на длину волны $\lambda_{ср}$, причем значения $\lambda_{изм}$ и $\lambda_{ср}$ выбираются с учетом избирательного характера поглощения излучения исследуемым веществом. После прохождения через кювету K с исследуемой жидкостью, где согласно (24) происходит поглощение излучения на длинах волн $\lambda_{изм}$ и $\lambda_{ср}$, отражателями $O_2—O_4$ через модулятор M потока направляются на фотозащиты Φ . Противофазная модуляция двух потоков позволяет получать на выходе фотозащиты переменный сигнал с амплитудой, определяемой разностью потоков и пропорциональной контролируемой концентрации. После усиления и преобразования в усилителе $У$ этот сигнал используется для поворота компенсационной заслонки $КЗ$ на угол α , обеспечивающий сведение к нулю разности потока в измерительном и сравнительном каналах. Угол α является мерой контролируемой концентрации.

Несколько иной метод применен в ФРКК с уравнивающим преобразованием с цифровым отсчетом, схема которого приведена на рис. 36,б [6]. Здесь также лучистый поток от излучателя ЛО

направляется по двум каналам — измерительному и сравнительному. Однако контролируемое фотоэлементом Φ различие в поглощении лучей в каналах обуславливается не отличием их спектральных составов, а прохождением через две различные кюветы, одна из которых ($KИ$) содержит исследуемую жидкость, а вторая ($KЭ$) — эталонную жидкость. Модуляторы M_1 и M_2 , управляемые, например, от мультивибратора $MВ$, осуществляют поочередное пропускание лучей через кюветы. Синхронно с модуляторами открываются ключи K_1 и K_2 , через которые импульсы фототока, усиленные

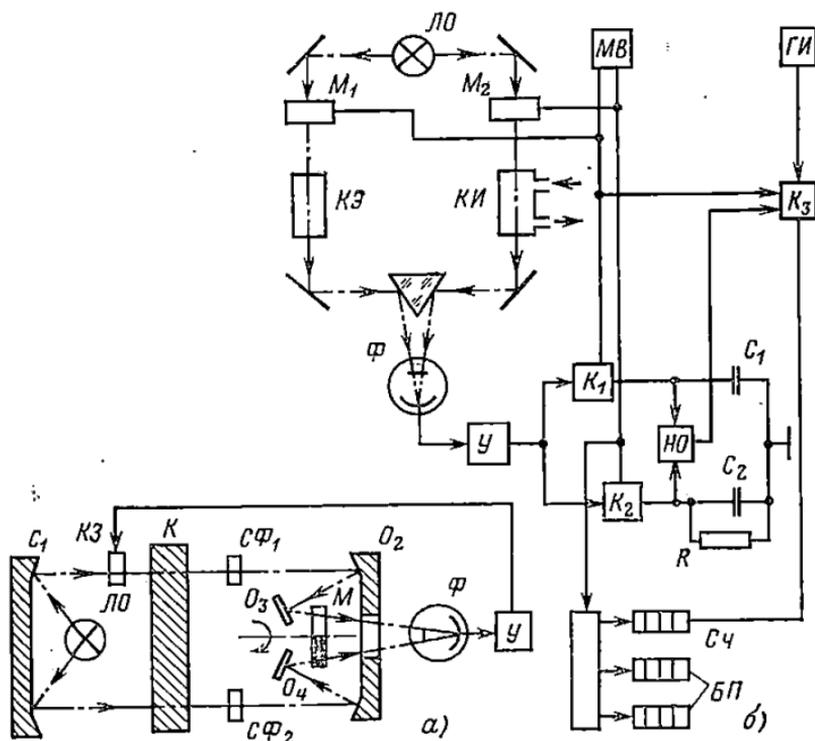


Рис. 36. Колориметрическое фотореле с уравнивающим преобразованием.

в усилителе $У$, направляются к запоминающим конденсаторам C_1 и C_2 , что обеспечивает их заряд соответственно до напряжений $U_{10} = kS\Phi_1$ и $U_{20} = kS\Phi_2$, где Φ_1 и Φ_2 — лучистые потоки, прошедшие соответственно через кюветы $KЭ$ и $KИ$; k — коэффициент, определяемый конструктивными и схемными параметрами; S — чувствительность фотоэлемента. В период, когда ключ K_2 разомкнут, а ключ K_1 замкнут, конденсатор C_2 , заряженный до более высокого напряжения, чем C_1 (при $\Phi_2 > \Phi_1$), разряжается через резистор R , и через некоторое время t_x напряжение на нем, определяемое соотношением $U_2 = U_{20}e^{-t_x/\tau}$, где $\tau = C_2R$, становится равным напряжению U_{10} на конденсаторе C_1 . Приравняв U_2 и U_{10} с учетом значений Φ_1 и Φ_2 , определяемых по формуле (24), можно показать, что

$t_x = \varepsilon_\lambda l \tau (C_0 - C_x)$, где C_0 и C_x — концентрации эталонного и исследуемого растворов (при условии, что эталонный и исследуемый растворы имеют одинаковый коэффициент ε_λ , а длины кювет $KИ$ и $KЭ$ равны). Из полученного соотношения следует, что t_x однозначно и линейно зависит от разности концентраций растворов в кюветах, а такие факторы, как колебания интенсивности излучения источника, чувствительности фотозлемента и усилителя, на точность работы ФРКК не влияют.

Для получения выходного сигнала в цифровой форме используется генератор импульсов $ГИ$, соединенный со счетчиком $Сч$ через ключ $К_3$. Этот ключ открывается синхронно с ключом $К_1$ в начале разряда конденсатора $С_2$ и закрывается через время t_x при поступлении импульса от нуль-индикатора $НО$, сравнивающего напряжения на конденсаторах $С_1$ и $С_2$. За время t_x в счетчике накапливается число импульсов, пропорциональное величине $C_0 - C_x$. Это число удерживается в счетчике до закрытия ключа $К_1$, после чего число переносится в буферную память $БП$, введенную для удобства считывания показаний, и счетчик $Сч$ сбрасывается на нуль. В следующие циклы переключений модуляторов процесс измерений повторяется.

Принципы, аналогичные описанным, применяются в ФРКК для газовых смесей. При использовании лазеров в качестве источников излучения обеспечиваются условия обнаружения газов, для которых чувствительность колориметрического метода мала и требуются пробеги светового луча в исследуемой среде в несколько сотен и тысяч метров; кроме того, создается возможность определения средних величин концентраций газов над протяженными объектами, например химическими и нефтеперерабатывающими заводами, промышленными районами и городами.

Турбидиметрические и нефелометрические ФРК. Турбидиметрические и нефелометрические методы используются для измерения концентрации взвешенных частиц в жидкостях и газах. При пропускании через среду, содержащую взвешенные частицы, светового потока часть света рассеивается частицами и возможно определение концентрации частиц по ослаблению первичного светового потока (турбидиметрический метод) и по интенсивности рассеянного потока (нефелометрический метод).

В турбидиметрах, применяемых обычно для контроля высоких концентраций, как и в колориметрах, процесс измерения сводится к определению соотношений величин Φ_0 и Φ , где Φ_0 — первичный световой поток, Φ — световой поток на выходе из исследуемой среды в направлении падающих лучей. Если исходить из предположения, что твердые взвешенные частицы непрозрачны, одинаковы по размерам и имеют форму шара радиусом r , то

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\pi r^2 l C}, \quad (25)$$

где C — концентрация частиц; l — толщина слоя исследуемой среды.

Зависимость (25) используется в разнообразных турбидиметрических ФРК (ФРКТ) для контроля мутности питьевой воды, выбраковки бутылок с напитками, лекарствами и т. п., содержащих инородные частицы, для контроля работы фильтровальных аппаратов и центрифуг, для определения концентрации дыма, пыли и др.

Фототурбидиметры подобны фотоколориметрам, но применяются без светофильтров. На рис. 37 показана оптическая схема индикатора дыма, представляющего одноканальное ФРКТ с прямым пре-

образованием. В металлической трубке T , пропущенной через дымоход $ДХ$, с одной стороны устанавливается источник света постоянной интенсивности $ЛО$, а с другой стороны — фотозащитный элемент Φ . Между ними помещаются фокусирующие линзы $Лн_1$ и $Лн_2$ и защитные стекла $ЗС_1$ и $ЗС_2$. Дым, проходящий через отверстия в трубке T , пропорционально своей плотности уменьшает освещенность фотозащитного элемента. Фотозащитный элемент включается в схему, реагирующую на затемнение. Линзы и защитные стекла очищаются от осаждающейся сажи воздухом, принудительно направляемым на них соплами или поступающим через отверстия в трубке перед стеклами (как показано на рис. 37) за счет разности давлений в дымоходе и атмосферного (в дымоходе всегда имеется разрежение).

Как и в случае ФРКК, повышенная точность работы ФРКТ достигается при использовании метода уравнивающего преобразования. На рис. 38 показана электрическая схема одноканального компенсационного ФРКТ для суспензий [32].

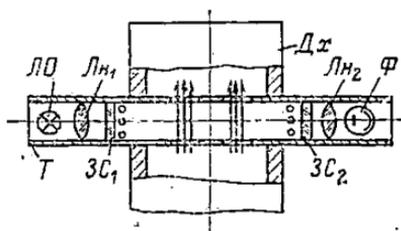


Рис. 37. Оптическая схема индикатора дыма.

Оптическая система смонтирована в наконечниках с осветителем $ЛО$ и фоторезистором Φ , установленных в расширенном участке трубы, по которой протекает исследуемая среда. Изменение концентрации суспензии вызывает изменение освещенности фоторезистора и разбаланс моста, в плечо которого включен. После усиления сигнал разбаланса приводит в действие реверсивный электродвигатель M , который перемещает движок автотрансформатора $АТр$, питающего осветитель $ЛО$, в направлении устранения разбаланса. Таким образом, сопротивление фоторезистора поддерживается постоянным благодаря компенсации изменений оптической плотности суспензии регулировкой силы света осветителя. Выходным сигналом ФРКТ является напряжение питания осветителя, поступающее после выпрямления на выходное устройство $ВУ$.

В нефелометрических ФРК (ФРКН) контролируется соотношение световых потоков Φ_0 и Φ_p , где Φ_0 — первичный световой поток; Φ_p — рассеянный световой поток. Для потока Φ_p , рассеянного в направлении, перпендикулярном падающему лучу, при малых размерах частиц (по сравнению с длиной волны λ используемого излучения) справедлива зависимость

$$\Phi_p = \Phi_0 k \frac{Nv^2}{\lambda^4}, \quad (26)$$

где v — объем частицы; N — число частиц в единице объема; k — коэффициент, зависящий от показателей преломления частиц и окружающей их среды, а также принятых единиц измерения.

Измерение рассеянного светового потока позволяет определять небольшие концентрации взвешенных частиц, трудно поддающиеся контролю другими методами.

На рис. 39 показана оптическая, а на рис. 40. электрическая схема компенсационного двухканального фотоэлектрического нефелометра типа АМ-12 [52]. В измерительном канале нефелометра

свет от осветителя ЛО конденсорными и коллиматорной линзами $ЛН_1—ЛН_2$ через подстроечный и измерительный оптические клинья (КП и КИ) компенсатора направляется в шаровую кювету К, а затем в светоловушка СЛ. На оси, перпендикулярной к прямому световому потоку, перед окнами кюветы установлены фоторезисторы ΦP_1 и ΦP_2 , включаемые для повышения чувствительности схемы в противоположные плечи моста. На фоторезисторы ΦP_3 и ΦP_4 сравнительного канала, включенные в два других плеча моста, свет направляется полупрозрачным зеркалом ПЗ через нейтральные светофильтры СФ, используемые для предварительной балансировки схемы.

При изменении светорассеяния исследуемой среды меняется освещенность фоторезисторов ΦP_1 и ΦP_2 , что приводит к нарушению равновесия моста. Возникающий сигнал разбаланса после уси-

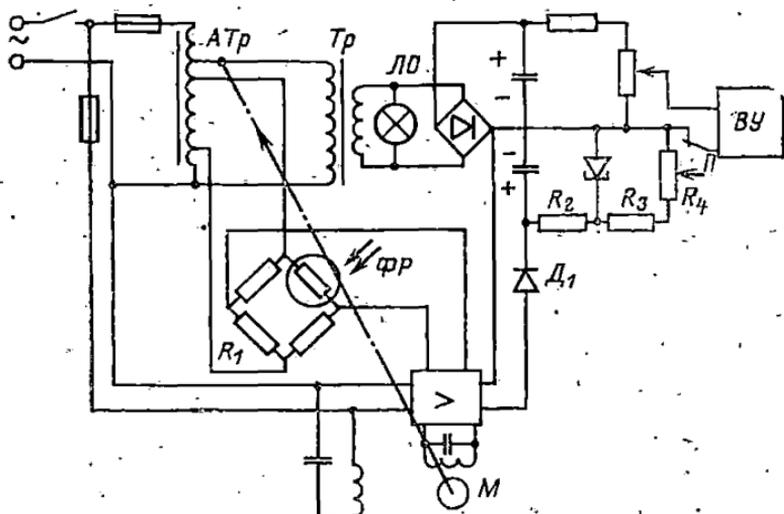


Рис. 38. Электрическая схема одноканального турбидиметрического фотореле.

ления подается на реверсивный двигатель M_1 , перемещающий клин КИ в положение, при котором восстанавливается начальная освещенность фоторезисторов. Одновременно двигатель M_1 перемещает стрелку отсчетного устройства ОУ и воздействует на преобразователь ПрП перемещения в унифицированный сигнал постоянного тока для устройств управления, защиты, сигнализации и т. д. В нефелометре предусмотрена система автоматической периодической подстройки нуля, включающая в себя программное устройство ПУ и реверсивный двигатель M_2 , связанный с клином КП и подключаемый по командам исполнительных контактов K_1 и K_2 программного устройства к выходу усилителя У при одновременном отключении двигателя M_1 и заполнении кюветы К «нулевым» раствором — чистой водой.

Зависимость (26) широко используется в пылемерах, счетчиках взвешенных частиц, приборах для контроля размеров частиц и т. п.

Поляриметрические ФРК (ФРКП). Поляриметрический метод применяется для контроля концентрации растворов оптически ак-

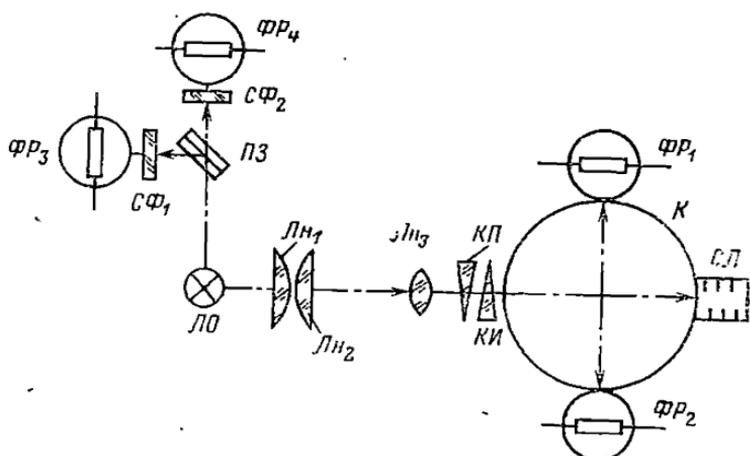


Рис. 39. Оптическая схема двухканального компенсационного фотоэлектрического нефелометра типа АМ-12.

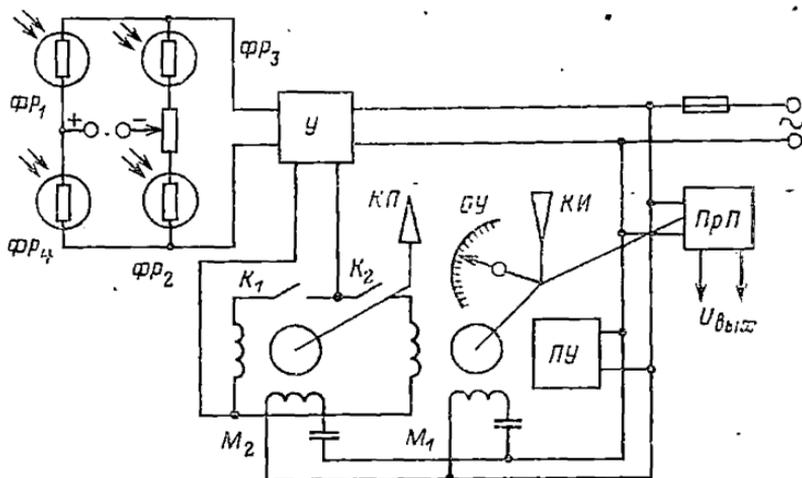


Рис. 40. Электрическая схема нефелометра типа АМ-12.

тивных веществ, т. е. веществ, способных вращать плоскость поляризации проходящего через них поляризованного света.

Для растворов с концентрацией C оптически активного вещества угол вращения плоскости поляризации равен:

$$\alpha = \alpha_0 l C, \quad (27)$$

где l — толщина слоя раствора; α_0 — удельная вращательная способность вещества, зависящая от длины волны света, в котором проводится измерение.

В поляриметрах поворот плоскости поляризации преобразуется в изменение светового потока с помощью поляризатора и анализатора, выполненных из поляроидной пленки или оптических призм специальной конструкции и пропускающих свет, поляризованный в одной плоскости.

При взаимно перпендикулярных плоскостях поляризации поляризатора и анализатора световой поток Φ на выходе из анализатора связан с углом вращения α соотношением

$$\Phi = \Phi_0 \cos^2 \alpha, \quad (28)$$

где Φ_0 — световой поток, поступающий на поляризатор.

На рис. 41,а показана структурная схема простого одноканального ФРКП с прямым преобразованием, содержащего осветитель ЛО с конденсором ЛК, светофильтром СФ и диафрагмой Д, поляризатор П и анализатор А, между которыми установлена кювета К с исследуемой средой, фотоэлемент Ф и исполнительный орган, например чувствительное реле или гальванометр Г, градуированный в соответствии с (27) и (28).

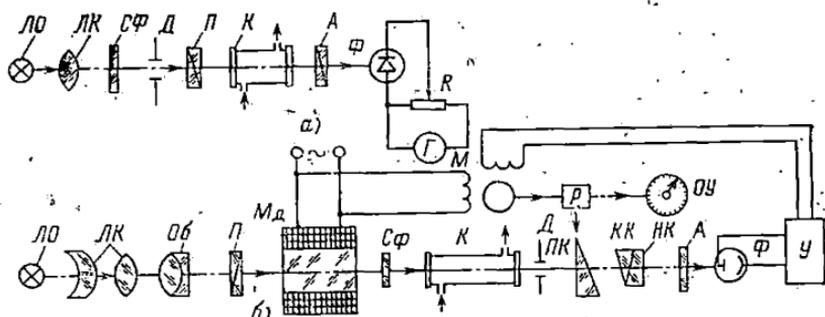


Рис. 41. Поляриметрическое фотореле.

В ФРКП с уравнивающим преобразованием величина и знак оптической активности вещества определяются обычно по значению угла и направлению вращения плоскости поляризации, необходимым для компенсации отклонения плоскости поляризации светового луча, прошедшего через слой исследуемой среды. При этом компенсация осуществляется вращением поляризатора или анализатора либо введением специальных компенсаторов.

На рис. 41,б показана структурная схема одноканального компенсационного фотоэлектрического поляриметра. Свет от лампы ЛО через конденсор ЛК и объектив Об направляется в поляризатор П и выходит из него плоскополяризованным. Поляризованный свет, плоскость поляризации которого приводится в колебание магнитооптическим модулятором Мд, проходит через светофильтр СФ, кювету К с исследуемым раствором, кварцевый компенсатор, анализатор А и попадает на фотоэлемент Ф.

Действие модулятора Мд основано на магнитооптическом эффекте Фарадея, сущность которого состоит в том, что прозрачные и полупрозрачные вещества, не обладающие способностью вращать плоскость поляризации света, приобретают ее под влиянием внеш-

него магнитного поля. В качестве вращающего вещества в модуляторе применяется свинцовое стекло; магнитное поле создается соленоидом, питаемым сетевым напряжением с частотой 50 Гц.

Компенсатор представляет систему кварцевых клиньев — подвижного *ПК* из кварца левого вращения и неподвижного *НК* из кварца правого вращения. Для компенсации отклонения луча, вызванного преломлением в кварцевых клиньях, введен стеклянный клин *КК*. Плоскости поляризации поляризатора и анализатора взаимно перпендикулярны, и при отсутствии в кювете *К* оптически активной среды свет на фотоэлемент не попадает. При введении среды, вращающей плоскость поляризации света, на фотоэлемент начинает попадать свет, интенсивность которого определяется соотношением (28). Вращение плоскости поляризации света исследуемой среды компенсируется перемещением клина *ПК*. Подвижный клин и связанное с ним отсчетное устройство *ОУ* перемещаются реверсивным двигателем *М* через редуктор *Р*. Одна из обмоток двигателя питается от сети переменного тока с частотой 50 Гц, а вторая (управляющая) — от усилителя переменного тока *У*, на входе которого включен фотоэлемент *Ф*. Двигатель вращается при подаче на обе его обмотки напряжения с частотой 50 Гц. Фаза и частота напряжения на управляющей обмотке, определяющие работу системы компенсации, зависят соответственно от знака и величины отклонения от 90° суммарного угла вращения плоскости поляризации средой и компенсатором (при отличии от нуля отклонения частота равна 50 Гц, при отсутствии отклонения 100 Гц) и не зависят от оптической плотности исследуемой среды, стабильности характеристик осветителя и фотоэлемента.

Поляриметры, у которых компенсирующий орган выполнен с электромеханическим управлением, имеют сравнительно небольшое быстродействие. Поэтому для контроля быстро протекающих процессов применяются поляриметры с электроуправляемыми компенсаторами. Примером подобного прибора является предложенный автором ФРКП с магнитооптическим компенсатором, который принципиально не отличается от магнитооптического модулятора в рассмотренном поляриметре [42]. В соленоид компенсатора после усиления подается ток фотоэлемента, освещаемого световым потоком, прошедшим поляризатор, исследуемую среду и анализатор. Величина этого тока, являющаяся мерой контролируемой оптической активности, автоматически устанавливается такой, что обеспечивается компенсация вращения плоскости поляризации света, вызванного исследуемой средой.

Для контроля концентрации взвешенных частиц в дисперсных средах различной природы может применяться разновидность ФРКП, использующая явление деполяризации плоскополяризованного света при рассеивании его частицами. Чем выше концентрация частиц, тем выше степень многократного рассеяния света и тем эффективнее деполяризация. Мерой деполяризации служит отношение интенсивностей потоков рассеянного света, прошедших через анализатор при расположении его оптической оси перпендикулярно и параллельно плоскости поляризации падающего поляризованного света.

Рефрактометрические ФРК (ФРКР). Рефрактометрический метод позволяет контролировать концентрацию растворов, чистоту жидкостей и твердых тел, состав смесей двух или более веществ и т. п. по измеряемой величине показателя преломления исследуемой среды. Для растворов имеет место соотношение

$C_x = C_0 \frac{n_x - n_0}{n_0 - n_p}$, где C_x — концентрация исследуемого раствора

с показателем преломления n_x ; C_0 — концентрация эталонного раствора с показателем преломления n_0 ; n_p — показатель преломления растворителя.

В фотоэлектрических рефрактометрах используются следующие явления: преломление света в призме, выполненной из контролируемой среды (спектрометрические рефрактометры); интерференция световых лучей, прошедших через две среды с разными показателями преломления (интерференционные рефрактометры); полное внутреннее отражение света, предельный угол которого зависит от показателя преломления контролируемой среды.

В спектрометрических рефрактометрах показатель преломления определяется по углу отклонения луча света в призме из контролируемого вещества (при исследовании жидких сред ими наполняют полые стеклянные призмы).

Примером ФРКР на базе простого спектрометрического рефрактометра является устройство, в котором свет осветителя через конденсор, светофильтр и диафрагму направляется на грань проточной кюветы, выполненной в виде полой стеклянной трубки призматической формы. Фотодиод устанавливается так, что при номинальном показателе преломления контролируемой жидкости луч, выходящий из кюветы, фокусируется на светочувствительную поверхность фотодиода. При изменениях показателя преломления луч отклоняется, фотодиод затемняется и фотореле включает сигнальное или регулирующее устройство. Чувствительность ФРКК составляет $5 \cdot 10^{-4}$ единицы показателя преломления.

Более высокая чувствительность (до 10^{-5} — 10^{-6} единицы показателя преломления) достигается в дифференциальных спектрометрических рефрактометрах. Примером такого прибора служит рефрактометр, оптическая схема которого приведена на рис. 42,а [31]. Кювета прибора ДК выполнена в виде двух стеклянных прямоугольных полых призм, сложенных основаниями. Одна призма наполняется эталонной жидкостью, а через вторую пропускается контролируемая жидкость. Луч на выходе из кюветы отклоняется по отношению к направлению входного луча на угол, пропорциональный разности Δn показателей преломления эталонной и контролируемой жидкостей (при малых значениях Δn). Отклонение луча компенсируется поворотом зеркала ЗК с помощью реверсивного двигателя М фотоэлектрической следящей системы. Одновременно двигатель перемещает стрелку отсчетного устройства ОУ, движок прецизионного потенциометра Р и кулачковые приводы контактов K_1 и K_2 для систем управления и сигнализации.

Система слежения за отклонением луча работает следующим образом. Модулятор МД в виде прозрачной вращающейся пластины клинообразного сечения с частотой 50 Гц отклоняет луч. При $\Delta n = 0$ луч совершает симметричные колебания относительно диафрагмы Д₁ и фотозлемента Ф. При этом изображение входной щели Д₂ заходит за оба края диафрагмы, выходной сигнал фотоэлемента модулируется с частотой 100 Гц и двигатель М неподвижен. При $\Delta n \neq 0$ симметрия колебаний луча нарушается и в выходном сигнале появляется составляющая с частотой 50 Гц, фаза которой зависит от знака Δn . Эта составляющая выделяется и после усиления в усилителе У поступает к двигателю, заставляя его вращаться в направлении компенсации отклонения луча.

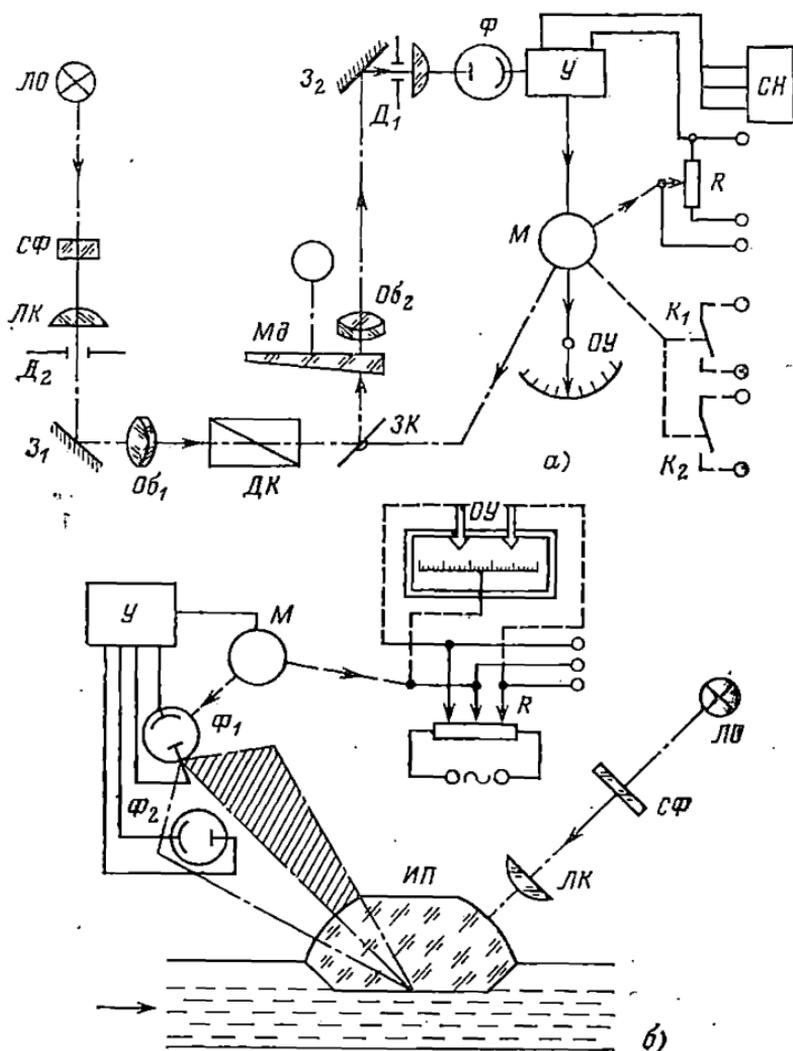


Рис. 42. Рефрактометрическое фотореле.

Конструкция спектрометрических дифференциальных рефрактометров в ряде случаев может быть упрощена, если использовать не оптические, а электрические методы компенсации.

Примером дифференциального рефрактометра с электрической компенсацией является прибор на базе фотоэлемента с продольным эффектом [29]. При $\Delta n \neq 0$ луч света здесь отклоняется от центра фотоэлемента, и появляющийся при этом электрический сигнал разбаланса направляется в автоматический компенсационный потенциометр типа ЭПП-09, где осуществляется его компенсация.

В интерференционных рефрактометрах, чувствительность которых достигает 10^{-7} — 10^{-8} единицы показателя преломления, свет от источника разделяется на два когерентных пучка, которые затем сводятся вместе и образуют интерференционную картину. Если на пути пучков установить две среды (эталонную и контролируемую) с показателями преломления n_0 и n , то в пучках возникает разность хода $\Delta = (n_0 - n)l$, где l — длина слоя среды, внесенного в пучки. Вследствие этой разности хода интерференционная картина смещается на определенное число m длин волн света λ , определяемое уравнением $(n_0 - n)l = m\lambda$. Зная l и λ , можно вычислить $\Delta n = n_0 - n$ по числу полос m , на которое смещается интерференционная картина, определяемому счетными устройствами.

В рефрактометрах, использующих явление полного внутреннего отражения, в отличие от спектрометрических и интерференционных оптическая система работает в отраженном, а не проходящем свете, благодаря чему такими рефрактометрами можно контролировать темноокрашенные и даже непрозрачные среды.

На рис. 42,б показана оптическая схема рефрактометра, использующего явление полного внутреннего отражения. Свет от ртутной лампы $ЛО$ через светофильтр $СФ$ и конденсор $ЛК$ направляется на сферическую поверхность измерительной призмы $ИП$, плоская грань которой омывается контролируемой средой. Свет, отраженный от плоской грани призмы, проходит через выходную сферическую поверхность призмы, выполняющую роль объектива. Благодаря тому, что показатель преломления материала призмы $ИП$ больше показателя преломления жидкостей, для которых используется прибор, обеспечивается возможность полного внутреннего отражения в призме. Вследствие того, что часть светового потока имеет угол падения, равный углу полного внутреннего отражения или меньший его, отраженные лучи образуют темную и светлую зоны, воздействующие на два фотозлемента — подвижный Φ_1 или неподвижный Φ_2 , причем граница светотени, соответствующая углу полного внутреннего отражения, перемещается в зависимости от показателя преломления контролируемой среды. При равновесном состоянии следящей системы, собранной по схеме на рис. 20,б и включающей в себя фотозлемента Φ_1 и Φ_2 , усилитель 2 и реверсивный двигатель $М$, граница светотени проецируется на щелевую диафрагму подвижного фотозлемента, сигнал на выходе усилителя отсутствует и двигатель неподвижен. При смещении границы светотени в результате изменения концентрации контролируемой среды подвижный фотозлемент оказывается в темной или светлой зоне и получает меньше или больше света. Неподвижный фотозлемент постоянно находится в светлой зоне. От положения подвижного фотозлемента (в светлой или темной зоне) зависит фаза выходного напряжения усилителя, определяющая направление движения двигателя $М$. Двигатель перемещает подвижный фотозлемент в положение, соответствующее равновесному состоянию следящей системы. Одновременно приводятся в движение стрелка отсчетного устройства $ОУ$ и контакт потенциометра R , используемого в системах контроля и регулирования технологических процессов.

Фотореле влажности газов, жидкостей и твердых тел

Для измерения влажности воздуха и газов широко применяются конденсационные гигрометры, работа которых основана на определении точки росы. Согласно закону Дальтона общее давление

смеси газов равно сумме парциальных давлений компонентов, и количество паров воды, являющихся составным элементом влажного газа, можно определить по их парциальному давлению. Если охлаждать влажный газ при неизменном давлении, то парциальное давление водяных паров остается неизменным вплоть до достижения температуры точки росы, при которой оно равно упругости насыщенных водяных паров. Зная температуру точки росы, можно по таблицам найти упругость насыщенных водяных паров, равную парциальному давлению водяных паров, а следовательно, определить влажность газа. Температура точки росы, как правило, определяется по температуре зеркальной поверхности в момент появления на ней первых признаков конденсата.

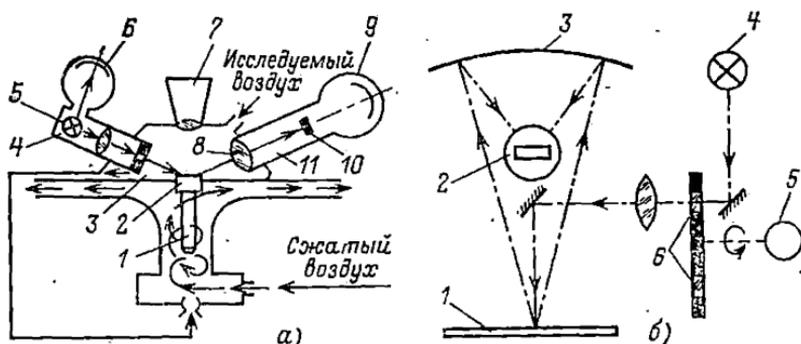


Рис. 43. Фотореле влажности.

Применение фотореле в конденсационных гигрометрах позволяет объективно и точно определить момент появления конденсата и позволяет создавать непрерывно действующие приборы. По изменению отражательной способности зеркальной поверхности, меняющему освещенность фотоэлемента, может быть различим конденсат до сухих долей микрограмма на квадратный сантиметр.

На рис. 43,а показана схема гигрометра типа ВГ-3 для определения влажности воздуха [51]. Струя исследуемого воздуха через устройство для контроля постоянства расхода подводится к измерительной головке 3 и обдувает конденсационную поверхность — зеркало 2. Для охлаждения зеркала используется самовакумирующаяся вихревая трубка, в осевую зону которой введен медный стержень 1 (хладопровод зеркала). Сжатый воздух, поступающий из внешней сети в сопло, образует вихрь со значительным градиентом статического давления по радиусу и высокой турбулентностью, обеспечивающими создание в центральной части трубки зоны пониженных давления и температуры. В измерительную головку ввернуты тубус 11 с фотоумножителем 9 измерительного канала, тубус 5 с источником излучения 4 и фотоумножителем 6 канала сравнения, а также тубус 7 для визуального наблюдения за состоянием зеркала. Свет от источника 4 направляется на зеркало 2 и на фотоумножитель 6. При отсутствии росы на зеркале световой поток фокусируется линзой 8 в точку на экране 10, препятствующем прохождению света на фотоумножитель 9. Засветка фотоумножителей 6 и 9 при этом одинакова, и сигнал на выходе балансной схемы, в которую включены фотоумножители, отсутствует,

При выпадании росы на зеркале 2 световой поток от осветителя рассеивается и, минуя экран 10, попадает на фотоумножитель 9, увеличивая его сигнал при неизменной засветке фотоумножителя 6. В результате на выходе балансной схемы появляется сигнал, соответствующий количеству выпавшей на зеркале росы и вызывающий срабатывание выходного поляризованного реле. Своими контактами это реле включает лампочку «Роса», по сигналу которой производится отсчет температуры зеркала. Для измерения температуры используется термометр сопротивления, помещенный непосредственно под зеркалом в канавку на боковой поверхности стержня 1. Снаружи канавка закрыта стальной гильзой, находящейся внутри катушки генератора высокой частоты. При включении генератора в гильзе индуцируются вихревые токи, происходит нагрев гильзы и зеркала, что ускоряет процесс испарения выпавшей росы.

В гигрометрах для непрерывного контроля и регистрации влажности используются фотоэлектрические системы, следящие за постоянством уровня осадка на зеркале и автоматически поддерживающие температуру конденсационной поверхности на уровне температуры точки росы путем воздействия на нагреватели или охладители, например полупроводниковые термоэлементы.

Значительной чувствительностью обладает метод определения влажности газов, жидкостей, твердых тел, основанный на способности воды и водяных паров сильно поглощать инфракрасное излучение (например, на длинах волн 1,37; 1,9; 2,7; 3,2; 6,3 мкм). На рис. 43,б показана схема фотоэлектрического влагометра фирмы «Анакон» (Англия), который использует этот метод. Прибор предназначен для непрерывного измерения содержания воды в сыпучих материалах, бумаге, пленке и других материалах, отражающих инфракрасное излучение [20]. Он измеряет отношение светорассеяний на длинах волн 1,9 и 1,7 мкм, одна из которых (измерительная) сильно поглощается водой, а поглощение другой (опорной) практически не зависит от содержания воды. Излучение измерительной и опорной длин волн поочередно выделяется из светового потока источника 4 двумя интерференционными фильтрами 6, установленными в диске, который вращается двигателем 5 с постоянной скоростью. Отраженное от контролируемого материала 1 излучение собирается отражателем 3 и направляется на сернистосвинцовый фоторезистор 2. На выходе фоторезистора генерируются при этом две серии импульсов с амплитудами, соответствующими светорассеянию для измерительной и опорной длин волн. После усиления серии импульсов разделяются и преобразуются в два сигнала постоянного тока, пропорциональные амплитудам импульсов. Разность этих сигналов является мерой влажности.

В модификации прибора для контроля влажности жидкостей сравниваются сигналы, соответствующие светопропусканию контролируемой среды для излучения измерительной и опорной длин волн.

Прибор работает в диапазоне от сотых долей до 10% влажности; погрешность не превышает $\pm 1\%$.

Фотореле вязкости

Применение фотореле в приборах для контроля вязкости повышает их точность и быстродействие, позволяет автоматизировать процесс измерений, обеспечивает возможность бесконтактных измерений.

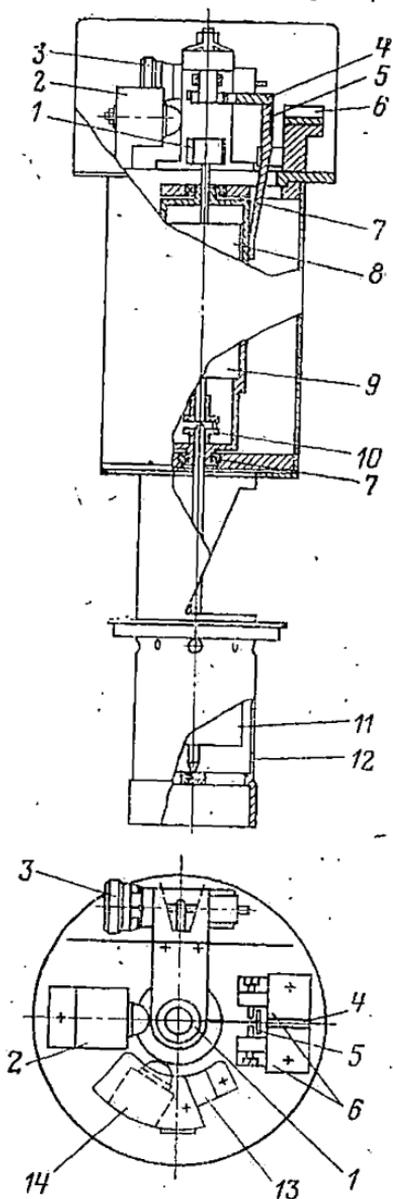


Рис. 44. Конструкция фотоэлектрического вискозиметра.

вращении зеркала 1, укрепленного на оси двигателя, вырабатывает импульсы с частотой, пропорциональной частоте вращения двигателя.

По схеме, аналогичной приведенной на рис. 32, строятся фотоэлектрические вискозиметры для жидкостей, использующие метод падающего шарика (метод Стокса). Приборы такого типа имеют

На рис. 44 показана конструкция фотоэлектрического вискозиметра, использующего в своей работе обратную пропорциональную зависимость частоты вращения двигателя (якорь двигателя помещен в исследуемую жидкость) от ее вязкости при фиксированном напряжении сдвига, приложенном к жидкости [87]. Прибор снабжен небольшим двигателем постоянного тока 8 с редуктором 9, установленным в подшипниках 7. Пустотельный якорь 11, связанный с валом двигателя муфтой сцепления 10 с малым сопротивлением изгибу, вращается в измерительном сосуде 12 с двойными стенками для проточного термостатирования. Напряжение сдвига, приложенное к исследуемой жидкости, вызывает момент сопротивления противоположного знака, действующий на корпус двигателя. При повороте корпуса двигателя момент уравновешивается противодействующей пружиной 4. Рукояткой 3 момент двигателя, определяющий напряжение сдвига, устанавливается с точностью $\pm 1,5\%$ путем смещения положения закрепленного конца пружины. Установленное напряжение сдвига поддерживается автоматическим регулятором момента двигателя. Источником сигнала рассогласования в регуляторе служит освещаемый лампой 2 двоянный фоторезистор 6, сигнал с выхода которого зависит от смещения связанной с корпусом двигателя вибрирующей заслонки 5. Частота вращения двигателя, являющаяся мерой вязкости, измеряется с помощью частотомера, в котором фотозлемент 13, освещаемый лампой 14, при

два фотореле, одно из которых включает, а второе выключает электросекундомер соответственно при прохождении шариком начального и конечного уровней. Для управления фотореле служат отражатели или прерыватели света, связываемые непосредственно с шариком или с элементами его подвески.

Целесообразным является применение фотореле и в приборах для определения вязкости по времени затухания колебаний маятника, опущенного в исследуемую жидкость. Подобный принцип используется в вискозиметре для летучих и коррозионных жидкостей, где герметичный цилиндр с исследуемой жидкостью подвешивается на струне из фосфористой бронзы (для измерений при высоких температурах цилиндр помещается в печь) и в результате начального отклонения от положения равновесия приводится в колебательное движение [73]. На струне (вне зоны нагрева) закреплено зеркальце; отраженные от него лучи света направляются на два фотодиода, соединенных со счетчиком колебаний и расположенных на разных расстояниях от начального (нулевого) положения струны. Мерой вязкости является логарифмический декремент затухания колебаний, равный $\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$, где α_1 и α_2 — углы расположения фотодиодов, отсчитываемые от нулевого положения струны ($\alpha_1 > \alpha_2$); N — регистрируемое счетчиком число колебаний маятника в процессе уменьшения амплитуды колебаний от α_1 до α_2 .

Фотореле температуры

Среди средств контроля температуры и управления нагревом особое место занимают фотоэлектрические устройства, в частности фотопирометрические (ФПУ), использующие в работе зависимость интенсивности и спектрального состава теплового излучения тел от их температуры. Достоинствами ФПУ, обеспечившими их широкое, а во многих случаях и преимущественное применение, являются бесконтактность измерений, возможность контроля как высоких (до 3000°C и выше), так и сравнительно низких (до 30°C и ниже) температур, быстрдействие (постоянная времени до 1 мкс), высокая чувствительность, позволяющая обнаруживать разность температур до 0,2°C, высокая разрешающая способность до 5 мкм [47].

Различают три типа ФПУ: яркостные, частичного излучения и спектрального отношения (цветовые).

Яркостные ФПУ основаны на измерении монохроматического излучения; приемником излучения в них служат фотоэлементы, снабженные светофильтрами. Между температурой T излучающего тела и фототоком I_Φ в яркостном ФПУ имеет место зависимость

$$I_\Phi = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_\lambda \tau_\lambda \epsilon_\lambda \lambda^{-5} \left(e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda, \quad (29)$$

где C — коэффициент, характеризующий геометрические параметры ФПУ; a — постоянная величина; λ_1 и λ_2 — границы узкого спектрального интервала длин волн, проходящих через светофильтр, который

рассчитан на пропускание основной длины волны λ (в яркостном ФПУ для $T > 700^\circ\text{C}$ обычно $\lambda = 0,65$ мкм); s_λ — спектральная чувствительность фотоэлемента для длины волны λ ; τ_λ — спектральный коэффициент светофильтра и оптической системы пирометра; ϵ_λ — коэффициент лучеиспускательной способности контролируемого тела ($0 < \epsilon_\lambda < 1$).

Так как интенсивность монохроматического излучения зависит от индивидуальных особенностей физического тела, определяющих значения ϵ_λ , яркостный пирометр, предназначенный для контроля температуры одного тела, нельзя применять без соответствующей градуировки для измерения температуры другого тела. Вследствие этого возникает необходимость градуировки пирометров по излучению абсолютно черного тела, для которого $\epsilon_\lambda = 1$, а вместе с тем и введения понятия яркостной температуры T_λ , связанной с истинной температурой T_π соотношением $\frac{1}{T_\lambda} = \frac{1}{T_\pi} \cdot \frac{\lambda}{a} \ln \epsilon_\lambda$.

Для многих физических тел ϵ_λ является сравнительно стабильной величиной, и температура T_π определяется введением постоянной для контролируемого тела поправки к T_λ .

Релейное яркостное ФПУ с прямым преобразованием представляет устройство в виде включенного по одной из схем, описанных в гл. 1, фотоэлемента, на светочувствительную поверхность которого через светофильтр фокусируется излучение контролируемого тела. Соответствующая настройка пороговой освещенности обеспечивает срабатывание ФПУ при заданной температуре тела. Погрешность таких ФПУ составляет 5—8% от верхнего предела рабочего диапазона.

На рис. 45 показана схема дифференциального яркостного ФПУ, погрешность которого не превышает $\pm 2^\circ\text{C}$ при 600°C и $\pm 10^\circ\text{C}$ при 3000°C [41]. Выходной сигнал здесь определяется соотношением интенсивностей излучений контролируемого тела E_τ и стабильной лампы накаливания E_λ . Через светофильтр 9 на катод фотоумножителя 11 при помощи вращающегося с постоянной частотой диска 10 с прозрачными и зеркальными секторами попеременно направляются излучение контролируемого тела, прошедшее через объектив 1, диафрагму 2, конденсор 3, фокусирующую линзу 4 и отраженное от полупрозрачного зеркала 5, и излучение лампы накаливания 7. Для исключения влияния положения лампы на величину светового потока, воспринимаемого фотоумножителем, лампу помещают в интегрирующий зеркальный шар 8. Окуляр 6, в который направляется часть излучения контролируемого тела, прошедшая через полупрозрачное зеркало, используется для визуальной проверки правильности визирования пирометра.

Ток фотоумножителя содержит постоянную и переменную составляющие, равные соответственно:

$$I_\Phi = \frac{k}{2} (E_\tau + E_\lambda); \quad I_{\Phi\sim} = k (E_\tau - E_\lambda),$$

где k — величина, зависящая от геометрии пирометра, спектральной чувствительности фотоумножителя для излучения, пропускаемого светофильтром, и спектрального коэффициента светофильтра и оптической системы.

Обратная связь по постоянному току с анода фотоумножителя на один из его диодов обеспечивает постоянство и независимость от E_T и E_L постоянной составляющей фототока. Переменная составляющая фототока, частота которой постоянна и определяется частотой вращения диска, а амплитуда зависит от разности величин E_T и E_L , где E_L — фиксированная величина, после усиления и преобразования в демодуляторе, синхронизированном с вращением диска, используется в качестве выходного сигнала ФПУ.

В ФПУ частичного излучения используется вся или большая часть области спектральной чувствительности применяемых фотоэлементов. Светофильтры в таких ФПУ обычно не применяются.

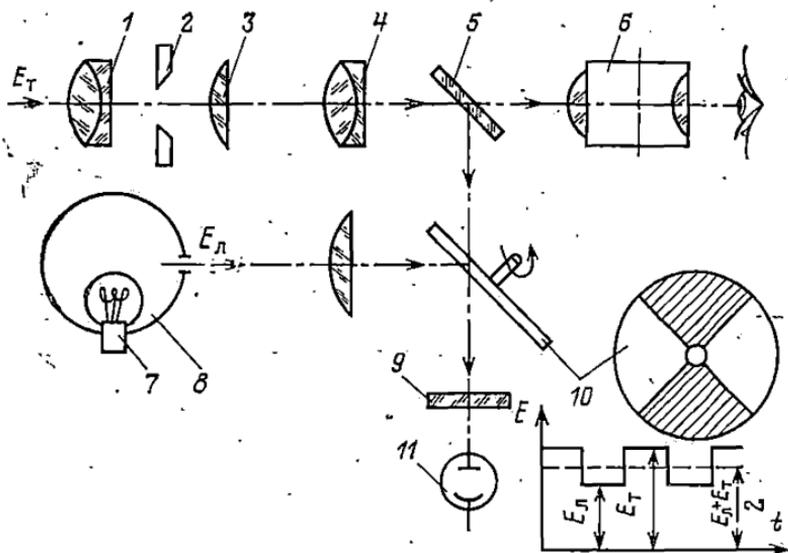


Рис. 45. Яркостный фотоэлектрический пирометр.

Для определения фототока в ФПУ частичного излучения может использоваться соотношение (29). В отличие от яркостных ФПУ рабочая спектральная область ФПУ частичного излучения имеет значительную ширину, и ее границы λ_1 и λ_2 определяются спектральным интервалом, внутри которого чувствительность применяемого фотоэлемента и коэффициент спектрального пропускания оптической системы прибора отличны от нуля. Для получения истинной температуры в показания пирометров такого типа вводятся поправки, учитывающие непостоянство величины ϵ_λ в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 .

Достоинством ФПУ частичного излучения является то, что на их приемники излучения поступает значительно больший поток лучистой энергии, чем в яркостных ФПУ (где светофильтры уменьшают поток, попадающий на фотоэлемент, на 80—90%). Это особенно важно при создании низкотемпературных ФПУ.

На рис. 46,а приведена схема пирометра частичного излучения компенсационного типа ФЭП-8 для контроля температуры в диапазоне 100—600°C с основной погрешностью, не превышающей

1,5% [47]. Потоки излучения контролируемого тела KT и компенсационной лампы $Л$ типа СМ-37, фокусирующиеся соответственно на отверстия O_1 и O_2 диафрагмы $Д$, модулятором $М$ поочередно направляются на сернистосвинцовый фоторезистор Φ с диапазоном спектральной чувствительности 1,8—3,5 мкм. На выходе фоторезистора создается сигнал с частотой модуляции 50 Гц и с амплитудой, пропорциональной разности потоков. Этот сигнал усиливается в усилителе переменного тока $УПерТ$, выпрямляется фазочувствительным детектором $ДФ$ и через интегратор $И$ поступает на усилитель постоянного тока $УПТ$, питающий лампу $Л$. Ток лам-

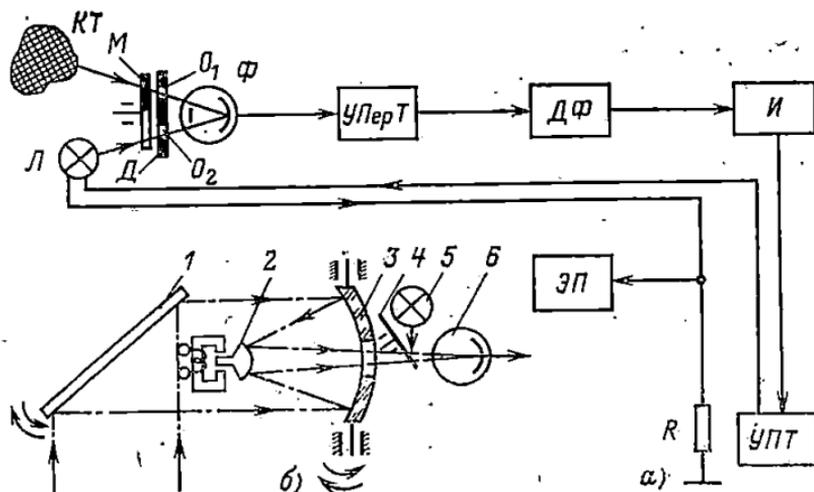


Рис. 46. Фотопирометрические устройства частичного излучения.

пы автоматически устанавливается до величины, обеспечивающей равенство сравниваемых потоков излучения. Создаваемое этим током падение напряжения на резисторе R измеряется автоматическим потенциометром $ЭП$ (типа КСП-4), градуированным в единицах яркостной температуры и снабженным выходными устройствами для систем управления и сигнализации.

Принципы пирометрии частичного излучения используются в сканирующих устройствах для многоточечного контроля температурных полей.

На рис. 46,б показана схема пирометра с оптико-механическим сканированием для контроля низкотемпературных полей [47]. Здесь для развертки относительно фотоэлемента $б$ теплового изображения объекта контроля используются колебания во взаимно перпендикулярных плоскостях параболического (или сферического) зеркала 3 с центральным отверстием и плоского (или гиперболического) зеркала 2 . Иногда вместо колебаний одного из этих элементов используют колебания плоского зеркала 1 . Приводом колеблющихся элементов служат кулачковые механизмы, электромагнитные системы и т. п. Модулятор 4 обеспечивает поочередную подачу на фотоэлемент излучения от объекта контроля и эталонного источника 5 .

Значительное повышение быстродействия, надёжности, экономичности достигается в системах с твердотельными мозаичными (матричными) и монолитными полупроводниковыми устройствами, имеющими электрическую развертку [47].

В цветových ФПУ измеряется отношение (логарифм отношения) интенсивностей монохроматических излучений контролируемого тела при двух длинах волн λ_1 и λ_2 (выбираемых в видимой или инфракрасной области спектра), которое зависит от спектрального состава теплового излучения и однозначно характеризует температуру тела.

Температура $T_{ц}$, измеренная цветovým ФПУ (цветовая температура), связана с истинной температурой $T_{н}$ соотношением

$$\frac{1}{T_{н}} = \frac{1}{T_{ц}} + \frac{1}{a} \frac{\frac{\epsilon_{\lambda 1}}{\lambda_1} - \frac{\epsilon_{\lambda 2}}{\lambda_2}}{\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

В цветových ФПУ отсутствуют погрешности, связанные с геометрией излучающей поверхности и изменением расстояния от пирометра до контролируемого тела; по сравнению с яркостными ФПУ и ФПУ частичного излучения уменьшается влияние на результат измерения неселективного поглощения промежуточной средой и нестабильности излучательных характеристик тела.

Цветовые ФПУ строятся по одно- или двухканальным схемам, использующим обычно один из следующих способов измерения отношения интенсивностей монохроматических излучений для двух длин волн:

непосредственное логометрическое измерение отношения сравниваемых величин;

приведение отношения к единице, при котором с помощью какого-либо редуцирующего устройства уравниваются обе величины (потоки излучения или пропорциональные им электрические сигналы) и положение редуцирующего устройства определяет измеряемое отношение;

стабилизация одной из величин, при которой путем общего для обеих величин редуцирования одна из них поддерживается постоянной, а вторая пропорциональна их отношению;

двойное редуцирование, при котором с помощью общего для двух величин редуцирующего устройства одна из величин поддерживается постоянной, а другая уравнивается с первой посредством второго редуцирующего устройства, характеризующего искомого отношения.

На рис. 47,а приведена схема одноканального инфракрасного цветového ФПУ [41]. Излучение контролируемого тела, фокусируемое на светочувствительную поверхность фотодиода ФД, прерывается диском ВД со светофильтрами $СФ_1$ и $СФ_2$, вращаемым синхронным двигателем $М_1$. Импульсы тока на выходе фотодиода имеют амплитуды I_1 и I_2 , пропорциональные интенсивностям монохроматических излучений, прошедших через светофильтры $СФ_1$ и $СФ_2$. После усиления в усилителе $У_1$ эти импульсы подаются на реохорд R следящей системы. Переключатель $П$, управляемый двигателем $М_1$, подключает вход усилителя $У_2$ поочередно то к реохорду R , то к его части R_x . Следящая система находится в равно-

вёсти, при выполнении равенства $I_1/I_2 = (\bar{R} - \dot{R}_x)/\bar{R}$. Если это равенство нарушается вследствие изменения отношения I_1/I_2 за счет изменения температуры, то на вход усилителя подается напряжение рассогласования $\Delta U = I_1 R - I_2 (R - R_x)$ и реверсивный двигатель M_2 перемещает движок реохорда до восстановления равновесия следующей системы. Положение движка определится контролируемой цветовой температурой.

На рис. 47,б показано двухканальное цветное ФПУ для индикации величин температуры, превышающих установленные, и для

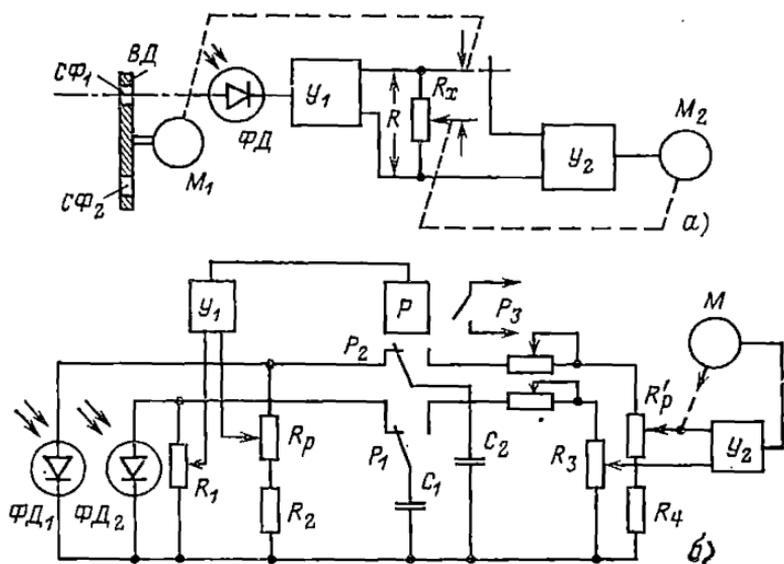


Рис. 47. Цветовые фотопирометрические устройства.

регистрации этих экстремальных величин [62]. От контролируемого тела на фотодиоды $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$ направляются потоки излучения различных длин волн. Резисторы R_1 , R_2 и задающий реохорд R_p , являющиеся нагрузками фотодиодов, подключены ко входу фазочувствительного релейного усилителя Y_1 . На выходе усилителя включено реле P , через замыкающие контакты которого P_1 и P_2 нагрузочные резисторы фотодиодов соединены с конденсаторами C_1 и C_2 . Постоянная времени заряда конденсаторов до напряжения сигнала фотодиодов достаточно мала, чтобы при максимальной скорости изменения температуры в контролируемом процессе отношение напряжений на конденсаторах U_{C1} и U_{C2} в любой момент времени с заданной точностью определяло мгновенное значение цветовой температуры тела T_n . Когда T_n превышает значение, заданное реохордом R_p , срабатывает реле P и его контакты P_3 включают исполнительные (сигнальные, управляющие) цепи, а через замыкающие контакты P_1 и P_2 конденсаторы C_1 и C_2 подключаются на вход регистрирующего логометра. Постоянные времени разряда конденсаторов C_1 и C_2 через резисторы R_3 , R_4 , R'_p достаточно ве-

лики и равны между собой, благодаря чему отношение U_{C1}/U_{C2} в любой момент времени равно начальному и определяется значением T_n в момент срабатывания реле P . Величина постоянных времени цепей разряда выбрана такой, что в течение времени установления показаний логометра сигнал разбаланса, поступающий на вход усилителя U_2 , достаточен для управления реверсивным двигателем M , перемещающим движок реохорда R'_p , указатель шкалы и каретку регистрирующего устройства до положения равновесия.

Цветовые ФПУ позволяют обнаруживать изменения температуры в несколько десятых долей градуса.

Фотопирометрические устройства могут использоваться не только в качестве первичных преобразователей температуры, но и как вторичные преобразователи различных систем контроля и регулирования тепловых процессов. Так, например, создан измеритель температуры поверхности вращающихся частей машин, где ФПУ воспринимает излучение светодиода, выполняющего роль первичного преобразователя, установленного вместе с миниатюрным автономным источником питания на контролируемой поверхности и изменяющего яркость излучения в зависимости от ее температуры [28].

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОРЕЛЕ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Фотоэлектрические регуляторы параметров технологических процессов

В автоматических регуляторах дискретного (позиционного и импульсного) и непрерывного действия для различных физических величин широко используются фотоэлектрические программные устройства, определяющие закон изменения регулируемых параметров, фотоэлектрические датчики регулируемых параметров, используемые в цепях обратной связи, фотоэлектрические усилители и преобразователи сигналов отклонения действующих значений регулируемого параметра от заданных.

Двухпозиционные регуляторы могут быть построены на базе практически любого из описанных в гл. 1 ФЭР. Для этого к выходу ФЭР (например, к контактам его исполнительного реле) подключается цепь управления электромагнитного клапана или другого регулирующего органа с двумя рабочими состояниями (открыто—закрыто, включено—отключено и т. п.), обеспечивающего прекращение изменения регулируемого параметра после достижения заданного его значения, при котором срабатывает ФЭР.

На рис. 48,а приведена принципиальная схема трехпозиционного универсального фотоэлектрического регулятора [38]. Примененный в нем датчик регулируемого параметра, например перемещения, выполнен на базе дифференциального фоторезистора ΦP ; задающим элементом служит потенциометр $R_{зд}$ (например, выходной потенциометр $R_{вых}$ фотоэлектрического программного задатчика со следящей системой рис. 20,а). Потенциометр $R_{зд}$ вместе с фоторезистором ΦP включен в мостовую схему сравнения действующих и за-

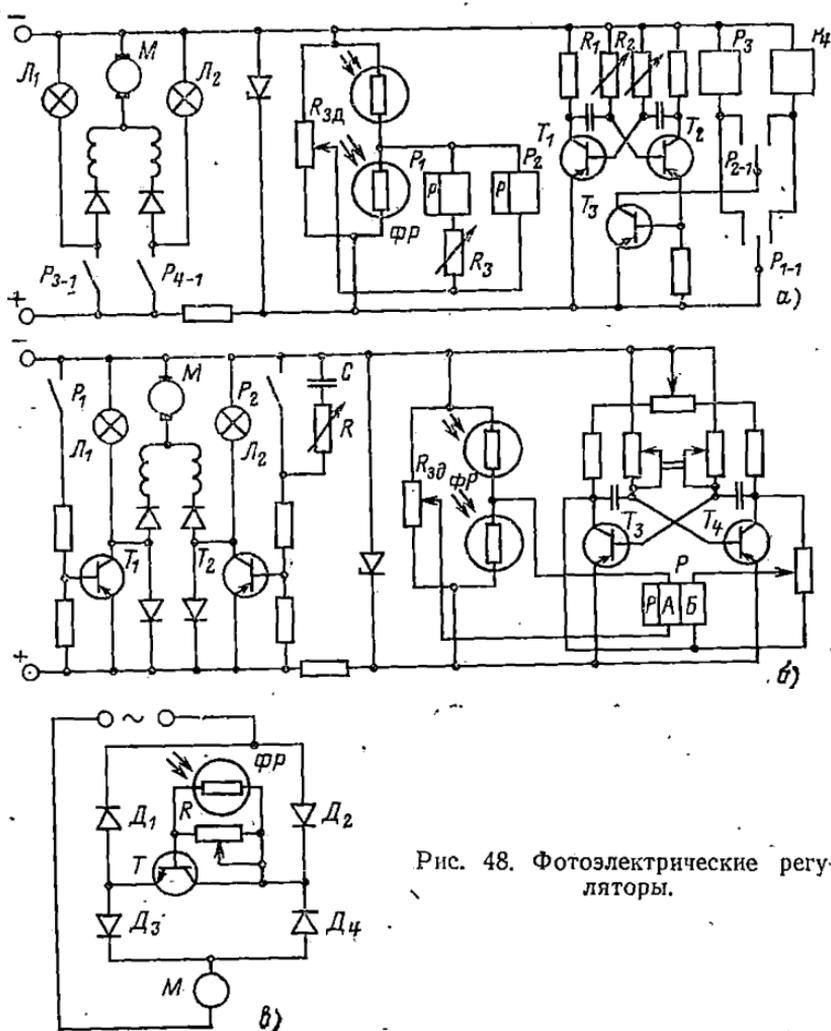


Рис. 48. Фотоэлектрические регуляторы.

данных значений регулируемого параметра. В диагональ моста непосредственно, как показано на схеме, или через усилитель включены обмотки двух поляризованных трехпозиционных реле P_1 и P_2 , управляющих через промежуточные реле P_3 и P_4 электродвигательным реверсивным исполнительным механизмом M . При наличии рассогласования между действующим и заданным значениями регулируемого параметра механизм M включается в направлении, обеспечивающем при воздействии на регулирующий орган убывание рассогласования. О наличии рассогласования и его знаке сигнализируют лампы L_1 и L_2 .

Для повышения устойчивости и точности работы регулятора, особенно в условиях управления объектами с большими постоянными времени, механизм M при подходе к заданному значению

регулируемого параметра включается импульсно, причем частота и длительность включения устанавливаются при настройке регулятора в зависимости от постоянных времени, запаздываний, скорости выходного органа механизма M и других параметров системы.

Для импульсного включения механизма M используются сигналы мультивибратора на транзисторах T_1 и T_2 ; посылаемые в обмотки реле P_3 и P_4 после усиления в транзисторе T_3 . Частота импульсов устанавливается резисторами R_1 и R_2 .

Для ускорения обработки больших рассогласований в регуляторе применена дополнительная система ускоренного регулирования. Основным ее элементом является реле P_1 , постоянно (а не импульсно) включающее механизм M через реле P_3 и P_4 при значительных токах в диагонали мостовой схемы сравнения, т. е. при большом рассогласовании (условия срабатывания реле P_1 устанавливаются резистором R_3).

На рис. 48,б представлена принципиальная схема импульсного фотоэлектрического регулятора, являющегося развитием регулятора рис. 48,а [39]. Здесь используется двухобмоточное трехпозиционное поляризованное реле P , одна из обмоток которого A , как и в рассмотренном регуляторе, включается в диагональ мостовой схемы сравнения, а вторая B — подключается к выходу мультивибратора на транзисторах T_3 и T_4 . Знакопеременный импульсный ток i_n , протекающий через обмотку B , обеспечивает (при наличии рассогласования между действующим и заданным значениями регулируемого параметра) импульсное включение механизма M с частотой ω_n ; задаваемой мультивибратором, и, кроме того, повышает чувствительность реле P , а следовательно, и точность регулятора за счет уменьшения ширины зоны нечувствительности.

Длительность импульса t_n , включающего механизм M , в подобных регуляторах (при синусоидальном, пилообразном и тому подобном законах изменения i_n) оказывается зависящей от величины сигнала рассогласования. Действительно, величина t_n определяется условием продолжительностью периода, в течение которого выполняется условие $\omega_A i_p + \omega_B i_n \geq F_{ср\text{аб}}$, где i_p — ток разбалайса моста сравнения, протекающий через обмотку A реле P ; ω_A и ω_B — число витков обмоток A и B реле P ; $F_{ср\text{аб}}$ — намагничивающая сила срабатывания реле P . При $i_n = I_{па} \sin \omega_n t$, где $I_{па} < F_{ср\text{аб}}/\omega_B$, в предположении, что за время одного импульса изменение i_p мало,

$$\left\{ \begin{aligned} t_n &= \frac{1}{\omega_n} \left(\pi - \arcsin \frac{F_{ср\text{аб}} - \omega_A i_p}{\omega_B I_{па}} - \arcsin \frac{F_{отп} - \omega_A i_p}{\omega_B I_{па}} \right) \\ &\quad \text{при } \omega_A i_p > F_{ср\text{аб}} - \omega_B I_{па}; \\ t_n &= 0 \quad \text{при } \omega_A i_p \leq F_{ср\text{аб}} - \omega_B I_{па}, \end{aligned} \right.$$

где $F_{отп}$ — намагничивающая сила отпускания реле P (начало импульса определяется моментом, когда суммарная намагничивающая сила обеих обмоток реле P , увеличиваясь, достигает $F_{ср\text{аб}}$, а конец — моментом, когда намагничивающая сила, уменьшаясь, становится равной $F_{отп}$).

Отсюда следует, что при больших рассогласованиях, когда $i_p \geq \frac{1}{\omega_A} (F_{отп} + \omega_B I_{па})$, соответствующие контакты реле P непрерывно

замкнуты, т. е. $t_{\text{н}} = 2\pi/\omega_{\text{п}}$; по мере убывания $t_{\text{р}}$ величина $t_{\text{н}}$ уменьшается. Благодаря этому при подходе к заданному значению регулируемого параметра средняя скорость выходного органа механизма M уменьшается.

Вместо выходных электромагнитных реле в регуляторе применены более надежные транзисторные ключи T_1 и T_2 . Для увеличения точности в регуляторе исключено влияние гистерезиса статических характеристик элементов, обусловленного люфтами, зазорами и т. п. Для этого параллельно одному из контактов реле P включена цепочка из резистора R и конденсатора C . За счет тока разряда конденсатора соответствующий транзисторный ключ остается во включенном состоянии некоторое время после размыкания контакта реле P и происходит перерегулирование (выбег) в выбранном направлении. Величина выбега регулируется резистором R .

Фотоэлектрические регуляторы, показанные на рис. 48, а, б, могут быть использованы для регулирования перемещений, производительности насоса, давления и др. и обеспечивают точность отработки заданных перемещений подвижных элементов регулирующих органов до сотых долей миллиметра.

В импульсных регуляторах с фотоэлектрическими преобразователями регулируемых параметров для частотно-импульсной и других видов модуляции во многих случаях целесообразно использовать фотоэлектрические генераторы.

На рис. 48, в показана схема фотоэлектрического регулятора непрерывного действия для стабилизации натяжения ленты, нити, проволоки и, в частности, магнитной ленты в магнитофоне [54]. Исполнительным механизмом служит асинхронный двигатель M , ротор которого вращается в направлении, противоположном моменту, создаваемому сматывающейся или наматывающейся лентой. Освещенность фоторезистора ΦP , подсвечиваемого лампой накаливания, определяется положением помещенной перед ним непрозрачной шторки, которая связана с подпружиненным рычагом, контактирующим с лентой и поворачивающимся на угол, зависящий от ее натяжения. Уменьшение натяжения ленты приводит к повороту шторки в направлении увеличения освещенности фоторезистора. При этом уменьшается сопротивление ΦP , растет ток базы транзистора T_1 , увеличивается постоянный ток в диагонали моста, образованного диодами D_1 — D_4 . Вследствие этого увеличивается ток через двигатель M , а следовательно, и создаваемый им тормозящий момент, что ведет к увеличению натяжения ленты. Это в свою очередь вызывает смещение шторки в сторону уменьшения освещенности фоторезистора, в результате чего момент на валу двигателя уменьшается. Таким образом, натяжение ленты, задаваемое резистором R , поддерживается постоянным.

Использование фотоэлектрических устройств позволяет создавать простые по структуре, точные и обладающие достаточным динамическим диапазоном звенья с переменными параметрами для самонастраивающихся регуляторов. Так, изменение освещенности фоторезистора, включенного в качестве входного сопротивления усилителя, дает возможность легко получать переменный коэффициент усиления звена, а варьирование постоянной времени достигается при включении фоторезистора во входную цепь интегрирующего усилителя [65].

Фотоэлектрические системы автоматического контроля и управления процессами механической обработки

Фотоэлектрические регуляторы широко используются в отраслях промышленности, связанных с механической обработкой, для контроля за положением изделий в процессе обработки и обнаружения поломки инструмента, для управления работой транспортно-загрузочных систем станочных линий, для пассивного и активного контроля размеров обрабатываемых изделий, для программного управления обрабатывающими станками и др.

Контроль наличия материала (листа, прутков, проволоки и т. д.) осуществляется с помощью ФЭР, в которых свет экранируется или отражается контролируемым материалом. При использовании ФЭР, реагирующих на отраженный свет, возможно не только обнаружение отсутствия материала, но также и прекращение его подачи,

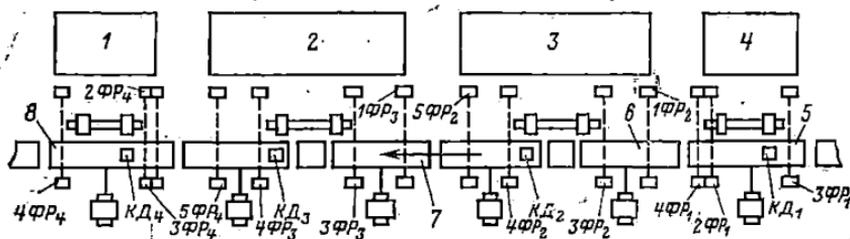


Рис. 49. Участок автоматической линии с фоторелейным управлением.

например, из-за неисправности подающего механизма. Сигналом служит отсутствие переменной составляющей фототока, обусловленной неоднородностями отражающей поверхности материала, при прекращении его движения.

На рис. 49 показана схема одного из участков автоматической линии с фоторелейным управлением для обработки вагонных осей [5]. Участок состоит из двух токарных автоматов 2 и 3, производящих одинаковые операции, двух магазинов (накопителей заготовок) 1 и 4 и конвейеров 5—8 с электроприводами. Загрузка-выгрузка автоматов производится гидравлическими подъемниками с тремя фиксированными положениями (верхним, средним и нижним). На подъемнике могут находиться реле заготовки (одна из них обработанная). В нижнем и верхнем положениях подъемника заготовки могут следовать по конвейерам 6 и 7; из среднего положения подъемника, когда заготовка поднята над конвейером, автомат загружается. На позициях загрузки-выгрузки магазинов заготовка может быть загружена при движении конвейера магазина по циклу: вверх — ход назад — вниз — ход вперед.

На каждом из конвейеров установлено по несколько ФЭР (см. рис. 3,а), выполняющих следующие функции: 1ФР — контролирует заготовку на подступах к магазину или автомату; если луч 1ФР пересечен, выгрузка из магазина или автомата невозможна; 2ФР — останавливает заготовку перед магазином; 3ФР и 4ФР — контролируют совместно с путевым выключателем нажимного действия КД правильное положение на позициях загрузки, а 4ФР, кроме

того, в случаях перебега заготовки за свой луч возвращает ее; $5ФР$ — контролирует заготовку после ее выхода из зоны загрузки.

Перед началом работы участка автоматы и магазины находятся в исходных положениях. Заготовка поступает с соседнего участка или выдается магазином 4, если к этому моменту луч фотореле $1ФР$ не перекрыт заготовкой. При требовании автоматами заготовок (включены реле, контролирующие наличие заготовки на позиции загрузки по нажатию путевого выключателя КД и нахождению ее между лучами фотореле $3ФР$ и $4ФР$) первая заготовка по конвейеру 5 поступает на конвейер 6. На позиции загрузки путевого выключатель $КД_2$ останавливает конвейер 6, и подается команда на загрузку заготовки в автомат 3 и ее обработку. Вторая поступающая заготовка следует по конвейерам 5, 6 и 7. На конвейере 7 заготовка останавливается от воздействия на $КД_3$ и загружается в автомат 2. Автомат начинает обработку. Третья поступающая заготовка останавливается перед автоматом 3 и подъемником переносится в верхнее положение. Обработанная заготовка выгружается на подъемник, опускается на конвейер 6 и удаляется по конвейерам 6—8. Автомат загружается новой заготовкой. Четвертая заготовка загружается в автомат 2, а обработанная удаляется. Конвейер 8 включается в работу при пересечении обработанной заготовкой луча фотореле $5ФР_3$, если к этому моменту на позиции загрузки магазина нет заготовки. При наличии заготовки фотореле $5ФР_3$ подает команду на загрузку ее в магазин 1.

Фотореле геометрических размеров, положений и перемещений применяются в системах управления обработкой в функции изменения значения контролируемого размера. Сигналы ФРГ, зависящие от соотношения заданного и фактического размеров, воздействуют на исполнительные органы станка для автоматического изменения режима обработки или остановки станка при достижении детали заданного размера, автоматической остановки станка и сигнализации, износа инструмента и т. д.

Для программного управления станками используются ФСС. В качестве примера на рис. 50 показана структурная схема устройства с фотоэлектрическим управлением для автоматической резки стеклопластиковых труб в процессе их изготовления на отрезки длиной до 12 м с точностью до $\pm 0,05$ мм [44]. Блок следящей каретки БСК в виде стола, движущегося на конических роликах по направляющим параллельно оси изготавливаемой трубы 17, с помощью ФСС, включающей в себя осветитель с оптикой 1, фотодиод 2, измерительный мост 3, усилитель 4, исполнительный двигатель 5 с редуктором 6 и зубчатой рейкой 8, непрерывно следует за торцом трубы 17 (условием баланса моста 3 является 50%-ная засветка светочувствительной поверхности фотодиода 2, экранируемой торцевой частью трубы). Отрезное устройство БОУ также выполнено в виде стола, движущегося по тем же направляющим, что и БСК. На нем смонтированы электродвигатель подачи 14 и электродвигатель привода 15 с алмазным кругом 16.

Синхронность движения БОУ и БСК достигается за счет использования следящей системы, включающей в себя установленный на столе БСК сельсин-датчик 7 и установленные на столе БОУ сельсин-приемник 9, усилитель мощности 10, исполнительный двигатель 11 с редуктором 12 и зубчатой рейкой 13. Эта следящая система непрерывно обрабатывает рассогласование между сигналами сельсинов 7 и 9, возникающее при движении БСК. Отрезное

устройство в процессе движения включает путевой выключатель, положение которого можно менять в зависимости от необходимого размера трубы, и подает командный сигнал на релейно-контактную схему управления двигателями 14 и 15. Концевой выключатель на столе двигателя 15 после разреза трубы переключает двигатель 14 на отвод режущего круга от трубы, а второй концевой выключатель на этом же столе отключает питание обоих двигателей. Отрезанная труба автоматически сбрасывается в накопитель, и вся система приводится в исходное состояние. Фотоэлектрическое реле 18 с исполнительной схемой 19 отключает питание БСК и БОУ в момент, когда отрезанный кусок трубы сброшен в накопитель. Этим достигается экономия электроэнергии и увеличивается долговечность электронных устройств.

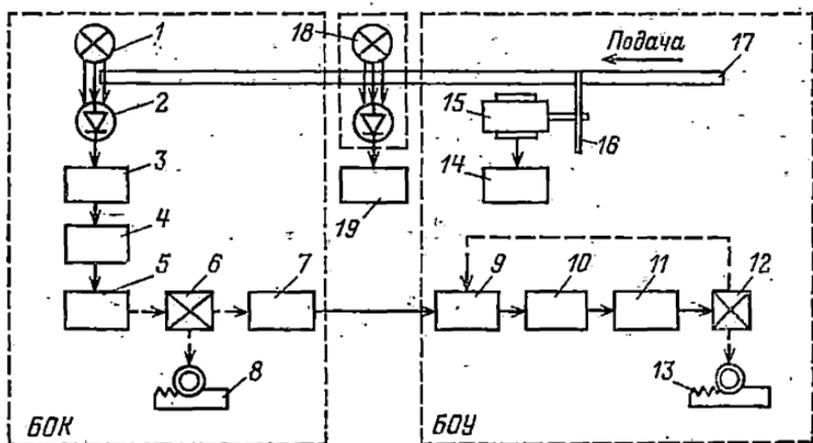


Рис. 50. Автоматическое отрезное устройство.

Программу работы станков в ряде случаев удобно задавать в виде чертежа, выполненного в определенном масштабе. Для считывания программы с чертежа и управления приводами продольной и поперечной подач станка используются фотоэлектрические копировальные головки (ФКГ).

На рис. 51 представлена схема ФКГ фрезерного станка, обеспечивающая точность обработки до нескольких сотых долей миллиметра [22, 43]. В процессе копирования ось ФКГ непрерывно совмещается с линией чертежа. Свет от ламп накаливания 3 конденсором 2 направляется на линию чертежа 1. Отраженные от чертежа лучи фокусируются объективом 4 в плоскости анализатора 5, представляющего собой вращаемый синхронным двигателем M_1 диск с эксцентрично расположенным отверстием. При каждом обороте анализатора изображение линии чертежа дважды пересекается отверстием, и на выходе фотоэлемента Φ в эти моменты возникают импульсы фототока. После усиления импульсы поступают на сетки тиратронов L_1 и L_2 демодулятора. На аноды тиратронов подается переменное напряжение той же частоты, что и на двигатель M_1 . Если линия чертежа совпадает с диаметром AB окружности, опи-

сываемой отверстием, то углы зажигания тиратронов составляют 90° . Напряжения рассогласования, снимаемые с демодулятора, равны:

$$U_\psi = U_m \left(1 - \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right);$$

$$U_\Delta = U_m \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2},$$

где φ_1 и φ_2 — отклонения углов зажигания тиратронов от 90° .

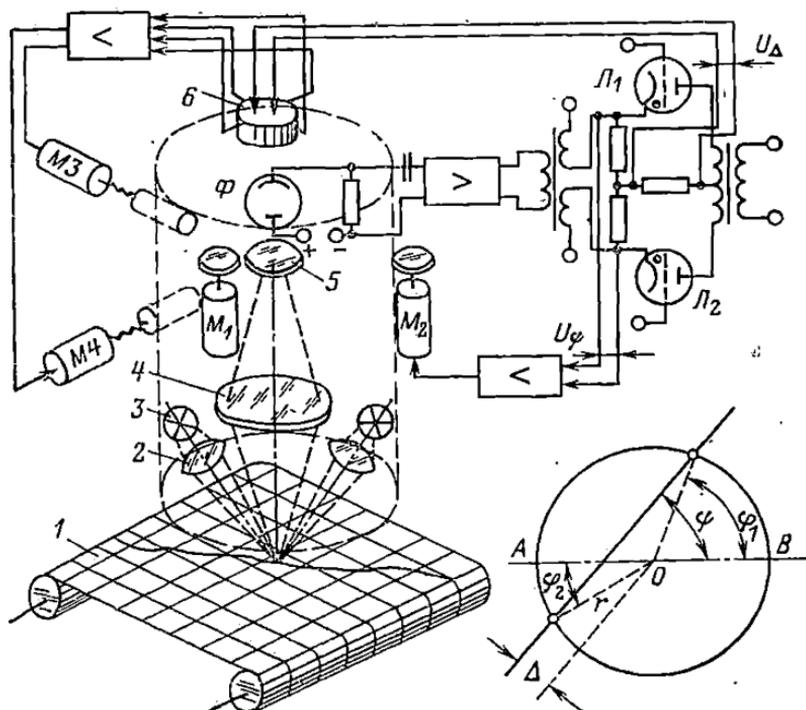


Рис. 51. Фотокопировальная головка фрезерного станка.

Угол наклона касательной к линии чертежа относительно диаметра AB равен $\psi = 0,5 (\varphi_1 + \varphi_2)$, а нормальное отклонение касательной от оси головки $\Delta = r \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$. Поэтому напряжение U_ψ связано с углом ψ , а напряжение U_Δ — с отклонением Δ .

Сигнал углового рассогласования U_ψ после усиления и преобразования поступает на двигатель M_2 , поворачивающий корпус головки до совмещения диаметра AB с касательной к линии чертежа или до того момента, когда они станут параллельными. С корпусом головки связан синусно-косинусный потенциометр δ , на который

подается сигнал U_{Δ} . На выходе потенциометра создаются две составляющие сигнала, пропорциональные синусу и косинусу угла ψ . После усиления эти составляющие подаются на приводы M_3 и M_4 продольной и поперечной подач головки. Одновременно сигналы рассогласования направляются на приводы подач стола станка с закрепленной на нем обрабатываемой деталью.

Аналогичные фотокопируемые системы применяются в автоматах для газовой резки листовых материалов, в автоматах для изготовления клише и др. [41, 43, 50].

Фотоэлектрические контрольно-сортировочные автоматы

Различают два основных вида контрольно-сортировочных устройств — браковочные и сортирующие. Браковочные устройства распределяют готовые изделия или полуфабрикаты в зависимости от характеристик контролируемых параметров на две («годные» и «брак») или три группы («годные», «брак+», «брак-»). Сортирующие устройства распределяют изделия на большое число размер-

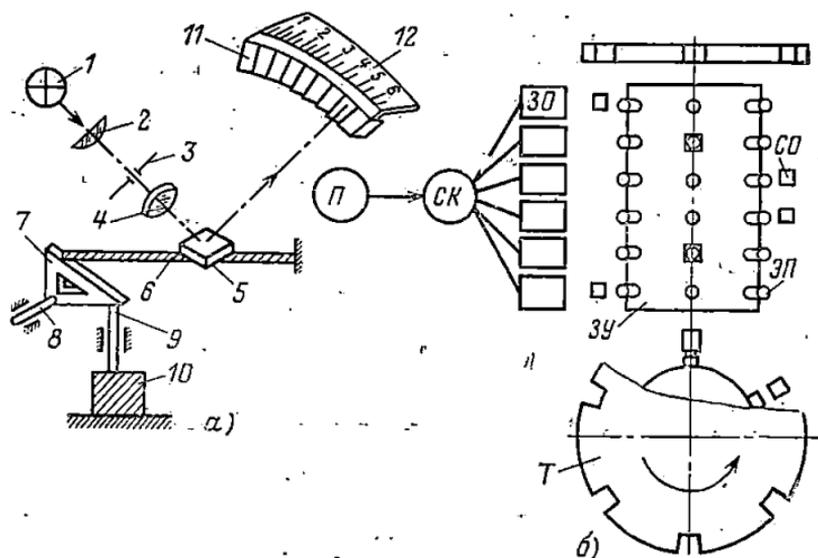


Рис. 52. Фотоэлектрический контрольно-сортировочный автомат.

ных групп, например, при сортировке изделий по геометрическим размерам, конфигурации, качеству поверхности, цвету, твердости и многим другим параметрам.

Принципы построения фотоэлектрических контрольно-сортировочных устройств могут быть рассмотрены на примере автомата для многодиапазонной сортировки деталей по геометрическим размерам. На рис. 52,а представлена оптико-механическая схема одного из таких автоматов. Свет лампы 1 через конденсор 2, диафрагму 3 и объектив 4 направляется на зеркало 5, укрепленное на спиральной пружине 6. Пружина, состоящая из двух половин, навитых в разные стороны, растягивается через угловую подвеску 7, которая может вращаться вокруг оси 8 при воздействии измерительного

стержня 9. При растягивании пружины зеркало поворачивается на угол, пропорциональный перемещению стержня. Луч света, отраженный от зеркала, направляется на блок фоторезисторов 11, число которых равно количеству сортировочных групп. Каждый из фоторезисторов включен в схему ФЭР, аналогичного показанному на рис. 3,а. В зависимости от размера контролируемой детали 10 освещаются соответствующее деление шкалы 12 визуального контроля и определенный фоторезистор блока. Фотоэлектрическое реле освещенного фоторезистора при этом включает исполнительный механизм соответствующей сортировочной группы.

На рис. 52,б представлена схема автомата для многодиапазонной сортировки, в котором в отличие от рассмотренного применен преобразователь перемещения луча П, имеющий только один фотоэлемент (фототранзистор) [48]. Здесь бегущий луч модули-

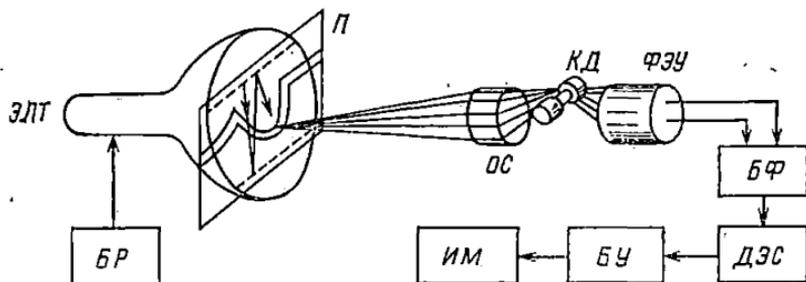


Рис. 53. Фотоэлектрические многомерное браковочное устройство.

руется, отражаясь от расположенной вдоль шкалы зеркальной растровой решетки, после чего тороидальным зеркалом фокусируется на фототранзисторе. Импульсы от преобразователя поступают на счетно-коммутирующее устройство СК. В зависимости от числа зарегистрированных импульсов СК подает сигнал на один из записывающих органов 30, который вводит результат в определенный элемент памяти ЭП, выдвигая подвижный штифт. Считывающие органы СО в виде контактов расположены так, что выдвинутые штифты встречаются с ними в тот момент, когда изделие в транспортном устройстве Т находится над соответствующим данному размеру накопителем.

Подобные автоматы сортируют изделия на десятки групп через несколько микрон с производительностью 5000—8000 шт. в час.

Автоматы на рис. 52 контролируют только один параметр. Контроль нескольких параметров и конфигурации деталей различной формы (многомерный контроль) позволяет осуществлять фотоэлектрическое браковочное устройство (рис. 53). Контролируемая деталь КД помещается между экраном электронно-лучевой трубки ЭЛТ и фотоумножителем ФЭУ. Электронный луч трубки под воздействием сигналов блока развертки БР совершает возвратно-поступательные перемещения в вертикальном направлении с частотой 50 Гц и одновременно перемещается в горизонтальном направлении с частотой 1 Гц. На экране трубки при этом возникает светящаяся точка. Изображение этой точки оптической системой ОС фокусируется в плоскости контролируемого сечения детали КД. Двигаясь в вертикальном направлении сверху вниз, изображение светящейся точки сначала находится вне детали и освещает катод

фотоумножителей. При перемещении изображения точки в область детали засвечивание фотоумножителя прекращается и появляется сигнал, который через блок формирования БФ направляется в двойный счетчик ДЭС. Вплотную к экрану трубки устанавливается прозрачная пластина П с двумя непрозрачными лицевыми, располагаемыми в соответствии с заданными нижним и верхним пределами поля допуска ниже и выше одной из линий контура изображения контролируемого изделия, полученного в определенном масштабе. Контур годной детали находится в пределах поля допуска, и свет от светящейся точки трубки при каждом вертикальном перемещении дважды прерывается и создает два импульса на входе счетчика: один при пересечении верхней линии поля допуска и второй при пересечении контура самой детали. Если контролируемые размеры детали превышают верхний предел поля допуска, то при каждом вертикальном перемещении светящейся точки создается только один импульс. Если же размер детали меньше нижнего предела поля допуска, то каждое вертикальное перемещение точки создает три импульса, поступающих в счетчик. Блок управления БУ в зависимости от числа, набранного счетчиком, обеспечивает соответствующее воздействие на исполнительный механизм ИМ сортирующего устройства.

Фирмой «Оптрон» (ФРГ) созданы фотоэлектрические устройства для многомерного контроля размеров изделий, использующие мозаичные полупроводниковые устройства.

В фотоэлектрических системах автоматического контроля качества поверхности изделий для обнаружения трещин, раковин, включений и т. п. применяются ФЭР, реагирующие на изменение отражательных свойств исследуемой поверхности, вызванное дефектами. Поэлементный осмотр производится с помощью сканирующих устройств, поле зрения которых должно быть того же порядка, что и наиболее мелкий дефект, подлежащий обнаружению. В качестве источников излучения таких систем, в частности систем для контроля поверхностей листовых материалов, проволоки и т. п., в процессе движения широко используются лазеры.

Луч лазера направляется на сканирующее устройство, выполненное, например, в виде вращающегося зеркального барабана и обеспечивающее перемещение луча в направлении, перпендикулярном движению контролируемого изделия. Отраженный от изделия луч воспринимается фотоэлементом, подключенным к анализатору. Анализатор выделяет переменную составляющую фототока, определяемую неодинаковостью контролируемой поверхности, выпрямляет ее и сравнивает с опорным напряжением постоянного тока или с сигналом, получаемым в результате отражения лазерного излучения от эталонной бездефектной поверхности. Получаемый сигнал используется для регистрации и приведения в действие исполнительного устройства, например пульверизатора, отмечающего краской бракованные участки, подлежащие удалению.

Автоматы для контроля и сортировки по цвету строятся по аналогичным принципам, но используют ФЭР, чувствительные к цвету (за счет применения светофильтров и фотоэлементов с соответствующими спектральными характеристиками). Такие автоматы, например, в пищевой промышленности разбраковывают по цвету яйца, отбирая отдельно желтые и белые, кофейные бобы, удаляя пережаренные, апельсины, отличая спелые, желтые плоды от незрелых, зеленых, контролируют белизну муки и др.

Часто контроль изделий основывается на измерении электрической величины (или неэлектрической величины, предварительно преобразованной в электрическую), причем показателем исследуемого качества изделия является не одно какое-либо значение при регламентированных условиях, а характер его изменения во времени или в функции какого-либо иного параметра (например, частотные характеристики усилителей, генераторов, фильтров, микрофонов, различные характеристики полупроводниковых и электровакуумных приборов, давление в цилиндрах работающего двигателя внутреннего сгорания и т. п.). Контролируемые характеристики в этих случаях целесообразно воспроизводить в виде кривых на экране электронного осциллографа (одно- или двухлучевого). Если при этом снабдить экран маской из непрозрачного материала с вырезкой, соответствующей ходу кривых при плюсовом или минусовом допуске, то кривые, видимые на экране, соответствуют годным изделиям, что может быть использовано для отбраковки негодных изделий с помощью фотореле.

Фотоэлектрические устройства защиты

Фотореле являются одним из распространенных средств защиты от производственного травматизма при эксплуатации прессов, каландров, циркуляционных пил и другого оборудования.

Принцип работы фотоэлектрических защитных устройств заключается в следующем. Опасная зона (например, пространство под штампом) многократно пересекается со стороны, доступной работающему, лучами света (обычно видимого), идущими в различных направлениях. При пересечении световой сетки в любом месте фотореле практически безынерционно включает сигнализацию и воздействует на машину (останавливает, изменяет направление движения подвижного органа и т. п.).

Достоинствами фотоэлектрической защиты по сравнению с другими средствами, например механическими, является то, что она не занимает рабочей площади, не мешает зрению, легко приспособляется к специфическим условиям любого производства без вмешательства в конструкцию машин.

На рис. 54,а показана принципиальная схема фотоэлектрического защитного устройства для прессов [35]. При прерывании светового луча, направленного на один из фоторезисторов ΦP_1 — ΦP_2 , коллекторный ток транзистора T становится меньше тока отпущения реле P ; реле выключается, и его контакты P_1 размыкаются, отключая привод ползуна пресса. При движении пресса в неопасном направлении (вверх) контакт P_1 шунтируется блокировочным контактом BK , связанным с приводом ползуна.

Благодаря использованию в исполнительных цепях замыкающего контакта P_1 происходит остановка пресса при обрывах проводов, идущих к фоторезисторам, при перегорании ламп осветителей и других неисправностях фотореле, приводящих к исчезновению тока в обмотке реле P . Таким образом осуществляется самоконтроль системы, необходимый для устройств защиты, в котором обычно предъявляются повышенные требования в отношении надежности.

К фотоэлектрическим устройствам защиты от травматизма по назначению и принципам построения близки фотоэлектрические системы охранной сигнализации, осуществляющие защиту от вторжений в запретные зоны, здания, жилые помещения и т. п. В слу-

Чаще секретности защиты применяется невидимое (обычно инфракрасное) излучение. При этом источником излучения может служить сам нарушитель. Температура тела человека (37°C) соответствует излучению с длиной волны $9,3\text{ мкм}$. Сернистосвинцовые или сурьмянистоиндиевые фоторезисторы, например, легко обнаруживают излучение на такой длине волны, а также на несколько больших длинах волн (до $10,5\text{ мкм}$), соответствующих температуре одежды человека, которая в холодные дни опускается до 0°C . Всенаправленное обнаружение осуществляется при размещении фоторезисторов в цилиндрическом колпаке, на котором выравнены линии, вызывающие модуляцию излучения при движении нарушителя в поле зрения прибора [85].

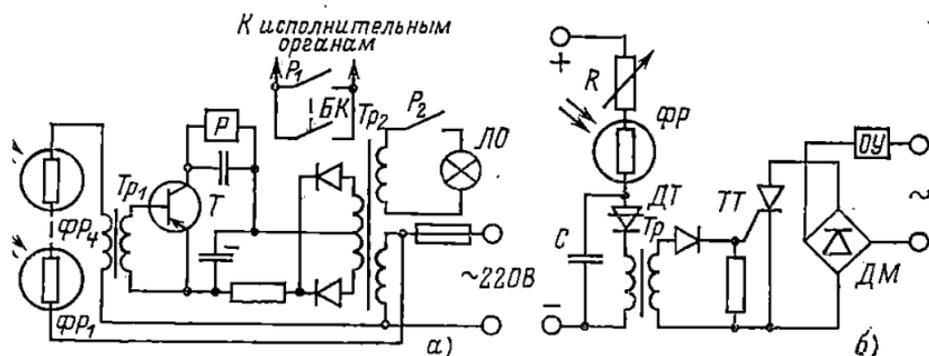


Рис. 54. Фотоэлектрическое устройство защиты.

Такие пассивные инфракрасные системы охраны в отличие от других типов охранных систем (емкостных, индуктивных, ультразвуковых доплеровских) не нуждаются в применении передатчиков, которые легко обнаруживаются и позволяют предпринимать контрмеры.

Применение фотореле в защитных автоматических устройствах не ограничивается системами защиты от травматизма и вторжений в запретные зоны. Фотореле уровня, например, применяются для создания автоматических сигнализаторов недопустимых изменений уровня воды в паровых котлах, загрузочных бункерах и др. Фотоколориметрический принцип широко используется в разнообразных автоматических сигнализаторах опасных концентраций токсичных и взрывоопасных газов и паров в производственных помещениях и атмосферном воздухе [60], например фотоколориметрический прибор типа ФЛ5501М для определения предельно допустимых концентраций (ПДК) аммиака, гидразингидрата, двуокиси азота, озона, окиси углерода, сернистого ангидрида, сероводорода, хлора; прибор типа ФК0066 для определения ПДК фтористого водорода, аммиака и двуокиси азота.

На базе подобных приборов создаются системы автоматической защиты с многоточечным контролем, обеспечивающие локализацию аварийной ситуации или аварийный останов технологического процесса при возникновении загазованности производственных помещений опасными продуктами.

Фотопирометрические и фотонелометрические реле, реагирующие на появление огня и дыма, являются основой многих автоматических противопожарных систем. Индикаторы погасания пламени на базе фотопирометрических реле позволяют контролировать наличие факела в камерах сгорания газовых турбин, котлов, нагревательных печей и других установок, работающих на жидком, газообразном и пылевидном топливе. При подаче сигнала на отключение подачи топлива индикаторы защищают разнообразные промышленные, энергетические, транспортные установки от взрывов и других опасных последствий, возникающих при погасании пламени. Схема одного из фотоэлектрических устройств для контроля за погасанием пламени приведена на рис. 54,б [33]. Погасание пламени приводит к уменьшению освещенности фоторезистора ΦP , росту его сопротивления и срыву генерации релаксационного генератора на диодном тиристоре ΔT . При этом запирается тиристор $T T$, связанный с генератором через разделительный импульсный трансформатор $T p$ и включенный в одну из диагоналей диодного моста ΔM ; обесточивается обмотка управления $O Y$ исполнительного органа системы подачи топлива, включенная во вторую диагональ моста ΔM .

Фотореле в системах автоматизации испытательных стендов

При испытании образцов материалов, полуфабрикатов, готовых изделий на прочность, износостойкость, виброустойчивость, надежность, ресурс и т. п. во многих случаях возникает задача автоматизации стендового оборудования с целью повышения его производительности, снижения трудоемкости исследований, увеличения достоверности результатов испытаний за счет более полного и точного воспроизведения условий реальной эксплуатации, моделируемых при испытаниях, и др.

Фотореле используются в испытательных стендах для решения таких задач, как программное управление испытательным воздействием (например, нагрузкой, перемещением, деформацией, температурой и т. п.), обнаружение и контроль повреждений элементов испытуемого объекта, автоматическая аварийная защита испытуемого объекта и стенда.

Один из распространенных методов испытаний на усталость, износ, ресурс и т. п. заключается в многократном приложении к испытуемому объекту циклически меняющихся нагрузок с заданными постоянными или программно-регулируемыми предельными значениями. Для реализации этого метода нашли применение системы автоколебательного типа, обеспечивающие создание переменных воздействий за счет возбуждения автоколебаний (релаксационных или резонансных) в замкнутом контуре, включающем в себя испытуемый объект [34]. Переключение источника воздействия (например, силовозбудителя) с режима нагружения на режим разгрузки и обратно в релаксационных автоколебательных системах производится с помощью пороговых релейных элементов при достижении предельных значений воздействия. Для проведения усталостных испытаний натурных конструкций разработан автомат нагружения с пороговым релейным элементом в виде триггера, переключаемого по сигналам концевых выключателей на фотодиодах. Концевые выключатели устанавливаются на шкале силоизмерительного прибора либо на пути перемещающихся или деформирующихся элементов испытуемого объекта таким образом, что один из них срабатывает при достижении заданного минимального

значения циклической нагрузки и переключает триггер в состояние, при котором исполнительный орган системы силовозбуждения обеспечивает рост нагрузки, а второй выключатель срабатывает при достижении заданного максимального значения нагрузки и переключает триггер в состояние, при котором обеспечивается убывание нагрузки.

На рис. 55,а представлена схема автомата нагружения, выполняющего те же функции, что и описанный, но реализующего многоступенчатые программы испытаний и использующего только один светочувствительный элемент — дифференциальный фоторезистор ΦP . Зависимость освещенности фоторезистора от нагрузки, прикладываемой к испытываемому объекту, достигается за счет применения фотоупругих элементов (см. стр. 51), использования стрелочных динамометров, деформометров и др., в которых устанавливается фоторезистор и к стрелке крепится легкий флажок, меняющий размер освещенной площади светочувствительной поверхности фоторезистора в зависимости от показаний прибора. Фоторезистор ΦP включается в мостовую схему, которая резистором R_1 балансируется при нулевой нагрузке. Резистор R_2 и коллекторно-эмиттерная цепь выходного транзистора T усилителя, сопротивление которой определяется освещенностью фоторезистора ΦP , с потенциометрами R_n и R_b установки нижнего и верхнего предельных значений нагрузки цикла образуют мостовые схемы, сравнивающие фактическое значение параметра силовозгруженности с заданными предельными значениями нагрузок цикла. Плечи, образованные резистором R_2 и транзистором T , являются общими для всех мостов, количество которых определяется числом ступеней n в реализуемой программе нагружения. В диагонали мостов включены обмотки двухобмоточного поляризованного реле P_1 , управляющего через промежуточные реле P_2 и P_3 исполнительными органами системы нагружения. Движки потенциометров R_n и R_b устанавливаются в положениях, для которых при заданных предельных значениях нагрузок ток через соответствующую обмотку реле P_1 равен току отпущения. Устройство обеспечивает автоматическое включение в плечи моста потенциометров R_n в процессе роста нагрузки, а потенциометров R_b — в процессе убывания нагрузки. Поочередное включение R_n и R_b соответствующих этапов программы производится контактами Π программного устройства, например многоцепного реле времени, определяющего продолжительность ступеней программы.

Для возбуждения колебаний различных объектов на резонансных частотах, например при испытаниях на вибропрочность, усталость и др., могут быть применены автоколебательные резонансные системы, использующие положительную обратную связь, стимулирующую возбуждение колебаний объекта на одной из собственных частот, для которой максимален сигнал в цепи обратной связи [37]. Положительная обратная связь в таких системах может осуществляться с помощью фотореле перемещений, скоростей и ускорений. Принцип работы таких систем заключается в следующем. При нарушении равновесия испытываемый объект начинает совершать колебания с собственной частотой. Эти колебания воспринимаются фотореле и преобразуются в электрические сигналы, которые после усиления по мощности используются для питания вибратора. Синфазность колебаний испытываемого объекта и воздействий вибратора устанавливается фазовращателем при настройке системы.

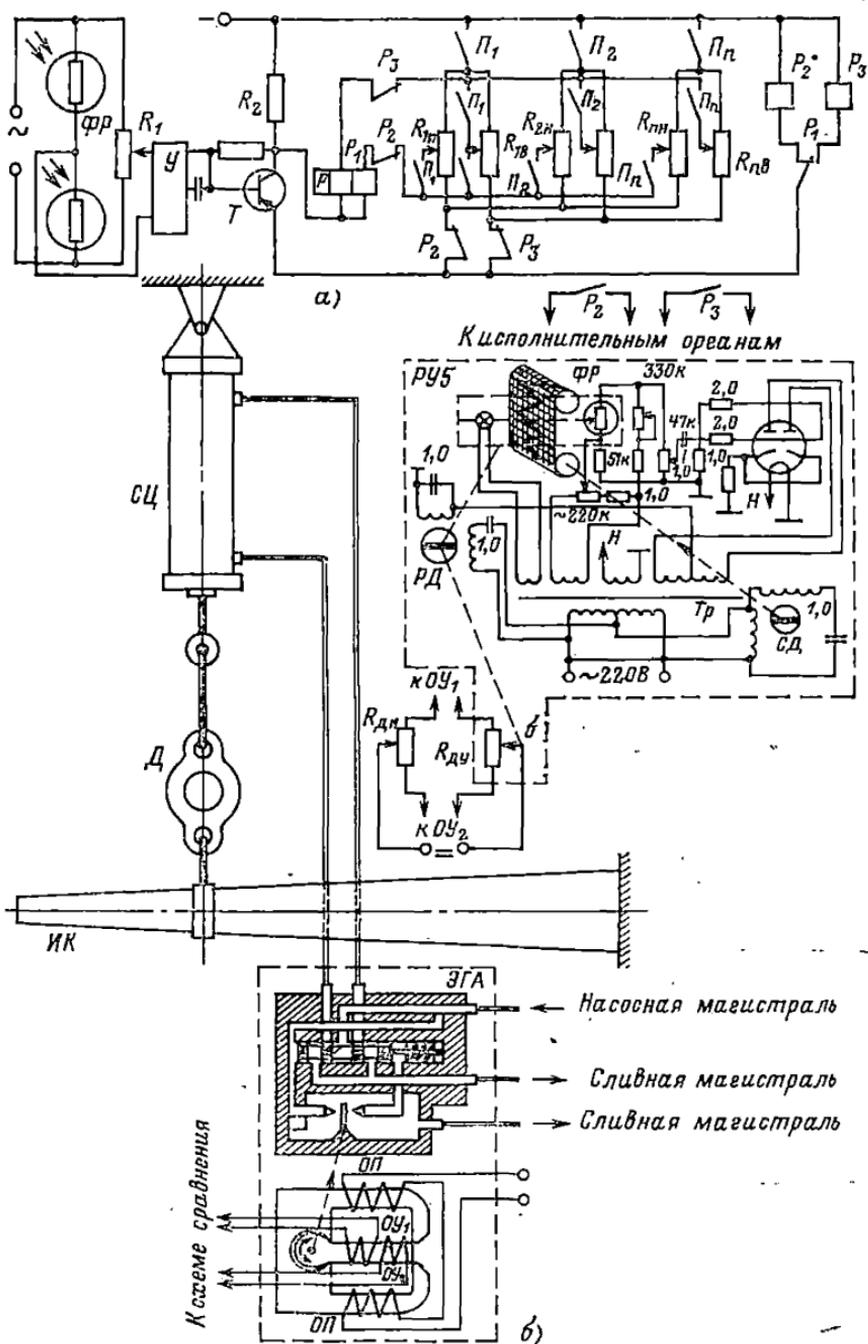


Рис. 55. Устройство с фотоэлектрическим управлением для проведения усталостных испытаний конструкций.

Для создания воздействий, меняющихся по сложным законам в функции времени или какого-либо иного параметра, используются системы с вынужденным режимом работы, в которых силовозбудители или другие источники испытательных воздействий отрабатывают сигналы задатчика, определяющие в соответствии с реализуемой программой характер изменения мгновенных значений воздействия. В качестве задатчика таких систем целесообразно использовать фотоэлектрические программные устройства, в которых реализуемая программа задается в виде рисованных графиков.

На рис. 55,б показан простой стенд с вынужденным режимом работы для испытаний на усталость по различным программам, в частности по программам, предусматривающим создание циклических нагрузок с амплитудами, меняющимися по случайному закону [34]. В качестве задатчика использовано фотоэлектрическое устройство типа РУ5 с выходным потенциометром R_{Σ} ; измерителем возбуждаемой нагрузки служит динамометр D с потенциометрическим преобразователем $R_{дв}$. Исполнительным органом является электрогидравлический агрегат ЭГА, представляющий собой двухкаскадный гидроусилитель, управляемый от поляризованного электромеханического преобразователя РЭП. Величина и направление расхода жидкости, определяющие знак и скорость перемещения поршня силового цилиндра $СЦ$, зависят от знака и величины разности токов в обмотках $ОУ_1$ и $ОУ_2$ преобразователя РЭП. Величины токов являются функцией отклонения фактического значения нагрузки от заданного ($ОП$ — обмотка подмагничивания РЭП).

Для обнаружения усталостных трещин и других повреждений элементов конструкций в процессе испытаний применяются фотореле, реагирующие на изменение отражательной способности поверхности при появлении и развитии трещин [45]; фотореле, подобные показанному на рис. 10,а, устанавливаемые на измеритель пропускаемого через испытуемый (металлический) объект тока и реагирующие на изменение электрического сопротивления образца при появлении и развитии трещины [19]; фотореле, контролирующие процесс колебаний испытуемого объекта и реагирующие на отклонение частоты колебаний в резонансной автоколебательной системе от начального значения при изменениях жесткости объекта в результате износа сопрягаемых его элементов, ослабления соединений, появления разрушений и т. п.

Фотоэлектрические счетчики часто применяются для учета количества циклов воздействий, приложенных к испытуемому объекту. Так, например, на базе фотореле скорости вращения строятся счетчики оборотов центробежного вибратора, возбуждающего колебания объекта при испытаниях на вибропрочность, усталость и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аваков П. К. Фотореле на тиристоре. — Приборы и системы управления, 1974, № 4, с. 47.
2. Автоматика в любительском ЭПУ. — Радио, 1975, № 3, с. 35—38.
3. Автоматические регистрирующие весы для седиментационного анализа жировой эмульсии молока. — Приборы и системы управления, 1971, № 12, с. 40.
4. Автостоп в магнитофоне. — Радио, 1969, № 5, с. 59.
5. Агапов А. Т. Система фотореле автоматической линии. — Механизация и автоматизация производства, 1966, № 6, с. 25—26.
6. Агейкин Д. И., Барбанель М. Р. Цифровой оптический сорбционный анализатор состава веществ. — Приборы и системы управления, 1973, № 5, с. 23—25.
7. Алексеев Ю. А. Дистанционная установка пределов регулирования в щитовых приборах со световым указателем. — Приборы и системы управления, 1971, № 1, с. 50.
8. Альтерман И. И., Мельников О. Н. Фотореле на магнитном усилителе. — Механизация и автоматизация производства, 1963, № 1, с. 44—45.
9. Аманназаров А. Аналитические приборы в павильоне «Химическая промышленность». — Приборы и системы управления, 1973, № 6, с. 60—64.
10. Андресон П. Л. Оптические устройства считывания знаков. — Зарубежная радиоэлектроника, 1970, № 1, с. 80—90.
11. Бесконтактный оптический датчик для контроля поперечного сечения цилиндрических тел. — Приборы и системы управления, 1972, № 8, с. 45—46.
12. Бердичевский М. Г. Принципы построения электроизмерительных приборов непосредственной оценки с дискретным выходом. — Приборы и системы управления, 1970, № 12, с. 34—36.
13. Берман Л. С. Триггерная схема на фотоварикапе, переключаемая светом. — Изв. вузов. Приборостроение, 1966, № 4, с. 15—17.
14. Будянов В. П. Частотный фотообразователь. — Измерительная техника, 1971, № 8, с. 23—25.
15. Васильев Я. В., Неермолов А. Ф. Применение фотогальванометрических усилителей для изотропного регулирования температуры. — Приборы и системы управления, 1971, № 6, с. 19—21.
16. Викторов В. А., Лункин Б. В. Измерение количества и плотности различных сред. М.: Энергия, 1973.
17. Герчес Г. А. Фотореле на транзисторах. — Приборостроение, 1965, № 1, с. 28.
18. Гринштейн М. М., Кучикян Л. М. Фотореле в радиолобительской практике. М.—Л.: Энергия, 1964.

19. Гугунишвили Г. Г., Чантурия Г. И. Усовершенствованная установка для испытания тонких монометаллических образцов покрытий на усталостную прочность. — Заводская лаборатория, 1975, № 10, с. 1275—1277.
20. Гусаков А. Ф. Некоторые промышленные анализаторы состава вещества, разработанные в Великобритании. — Приборы и системы управления, 1974, № 4, с. 61—62.
21. Дидух Ю. И., Кутькин А. И. Автоматическое управление паружным освещением. М.—Л.: Энергия, 1965.
22. Ефимов М. В. Следящие системы с оптическими связями. М.: Энергия, 1969.
23. Пат. 49-7191 (Япония).
24. Измерительно-управляющая система. — Экспресс-информация. Контрольно-измерительная техника, 1967, вып. 13, реф. 87.
25. Кашуба А. Электронный маяк. — Радио, 1974, № 2, с. 31.
26. Кравцов Н. В., Стрельников Ю. В. Позиционно-чувствительные датчики оптических следящих систем. М.: Наука, 1969.
27. Краймер Л. П., Матюхин С. А., Майоркин С. Г. Память кибернетических систем (основы мнемологии). М.: Советское радио, 1971.
28. Кривонос А. И., Русланов В. И. Некоторые схемы фотопреобразователей на полупроводниковых элементах. — Приборы и системы управления, 1970, № 3, с. 43—45.
29. Кролевец К. М. Слідкуючі фотоелементи. Київ: Техніка, 1965.
30. Кудряшов А. Фотозлектронный счетчик. — Радио, 1975, № 5, с. 36—37.
31. Кузнецова Н. Н. Народное предприятие Karl Zeiss Jena на весенней Лейпцигской ярмарке 1973 г. — Приборы и системы управления, 1973, № 8, с. 52—55.
32. Кулаков М. В., Жуков Ю. П. Измерители концентрации дисперсных систем (обзор). — Приборы и системы управления, 1975, № 8, с. 21—25.
33. Кунин А. Б., Горбатов В. Г., Биренберг И. В. Бесконтактное фотореле. — Приборы и системы управления, 1975, № 3, с. 41—42.
34. Литвак В. И. Автоматизация усталостных испытаний натуральных конструкций. М.: Машиностроение, 1972.
35. Литвак В. И. Автоматическая аварийная защита в системах управления. М.: Энергия, 1973.
36. Литвак В. И. Автоматическая аварийная защита в системах управления ресурсными испытаниями. — Вестник машиностроения, 1975, № 7, с. 20—23.
37. Литвак В. И. Использование вибростендов в автоколебательном режиме для натуральных испытаний. — Проблемы прочности, 1975, № 1, с. 81—86.
38. А. С. 420900 (СССР). Программный релейный регулятор/ В. И. Литвак, В. Г. Ободзинский. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1974, № 11.
39. Литвак В. И., Ободзинский В. Г. Программный трехпозиционный регулятор с импульсной коррекцией. — Приборы и системы управления, 1973, № 10, с. 27—29.
40. Литвак В. И. О требованиях по обеспечению надежности. — Приборостроение, 1965, № 3, с. 7—10.
41. Литвак В. И. Фотоэлектрические датчики в системах контроля, управления и регулирования. М.: Наука, 1966.

42. Литвак В. И. Фотоэлектрические поляриметры. — Приборы и средства автоматизации, 1964, № 11, с. 29—31.
43. Литвак В. И. Фотоэлектрические приборы и регуляторы в машиностроении. М. — Киев: Машгиз, 1962.
44. Макаревич С. В., Трохин В. М., Хорошилова И. Г. Автоматическое отрезное устройство. — Приборы и системы управления, 1969, № 5, с. 51—52.
45. Метод раннего прогнозирования и торможения трещин. — Заводская лаборатория, 1975, № 3, с. 358—361.
46. Методы и приборы расходомерии. — Приборы и системы управления, 1972, № 10, с. 15—35, № 11, с. 11—38.
47. Методы и средства измерения температуры. — Приборы и системы управления, 1971, № 10, с. 9—32.
48. Некоторые конструктивные особенности контрольно-сортировочных автоматов с фотоэлектрическими преобразователями. — Измерительная техника, 1971, № 7, с. 12—13.
49. Непрерывно-дискретные преобразователи и интеграторы для контроля технологических параметров конверторного процесса. — Механизация и автоматизация управления, 1966, № 3, с. 39—42.
50. Николаев П. В., Сабинин Ю. А. Фотоэлектрические следящие системы. Л.: Энергия, 1969.
51. Основные результаты разработки и испытаний гигрометра точки росы с вихревым охлаждением. — Приборы и системы управления, 1974, № 10, с. 21—22.
52. Парфенов В. И., Перлштейн А. А. Промышленный нефелометр повышенной точности и стабильности типа АМ-12. — Приборы и системы управления, 1972, № 8, с. 43—44.
53. Полторапавлова Г. С., Удалов Н. П. Фототиристоры. М.: Энергия, 1971.
54. Пташенчук Ю. Стабилизация натяжения магнитной ленты в магнитофонах. — Радио, 1974, № 12, с. 32—34.
55. Расчет фотоэлектрических цепей. М.: Энергия, 1967.
56. Родкевич С. Д. Методика расчета схем на фототриодах. — Изв. вузов. Приборостроение, 1961, № 1, с. 3—11.
57. Розенцвит Ц. И., Эйгенброт В. М. Задающие устройства. М.: Энергия, 1971.
58. Свечников С. В. Фотодвухполюсники. Киев: Техника, 1965.
59. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. М.: Советское радио, 1970.
60. Смаков М. М. Приборы для контроля загазованности производственных помещений. — Приборы и системы управления, 1974, № 6, с. 37—40.
61. Страшун А. З., Чернухин В. Ш. Программные регуляторы технологических процессов. Л.: Энергия, 1973.
62. Трубицин Е. В. О построении быстродействующих пирометров спектрального отношения. — Приборы и системы управления, 1975, № 12, с. 35—36.
63. Устройства ввода графической информации в ЭВМ. — Механизация и автоматизация управления, 1968, № 3, с. 52—54.
64. Фотодатчик с питанием фотодиода импульсным напряжением. — Приборы и системы управления, 1972, № 2, с. 38—39.
65. Чертовский В. Д. Самонастраивающиеся системы (СНС) с применением RC-цепей с фоторезисторами. — Изв. вузов. Приборостроение, 1968, № 3, с. 55—57.

66. Чурбаков А. В., Удалов Н. П. Оптоэлектронный генератор прямоугольных импульсов. — Приборы и системы управления, 1974, № 6, с. 42—44.
67. Шарадкин А. М. Оптоэлектронный многоустойчивый фазоимпульсный элемент. — Автоматика и телемеханика, 1969, № 11, с. 189—191.
68. Шилин А. Автоматический выключатель освещения. — Радио, 1974, № 10, с. 36.
69. Юдин Е. Е. Транзисторное фотореле на блокинг-генераторе. — Механизация и автоматизация управления, 1967, № 4, с. 46—48.
70. Язев П. Электронные весы. — Радио, 1971, № 4, с. 40.
71. Язев П. Электронный титратор. — Радио, 1975, № 5, с. 38—39.
72. Пат. № 3811775 (США).
73. A high temperature oscillating cylinder viscometer. — J. Phys. (J. Scient. Instrum.), 1975, № 11, p. 906—908.
74. Altman L. The medium of the message will soon be optoelectronic. — Electronics, 1972, vol. 45, № 4, p. 60—71.
75. Пат. № 3789674 (США).
76. Bailly-Salins R. Plastic optical fiber displacement sensor for study of the dynamic response of a solid exposed to an intense pulsed electron beam. — Rev. Sci. Instrum., 1975, № 7, p. 879—882.
77. Brach E. J. Photocell triggers counting circuit. — Electronics, 1965, vol. 38, № 13, p. 74—75.
78. Пат. 1167449 (Англия).
79. Digital flowmeter. — Austral. Mining, 1974, № 11, p. 72.
80. Fellows B. W., Marion D. A direct digital pressure transducer. — Adv. Instrum., vol. 24, pt I, Pittsburgh, Pa, 1969, p. 526/1—526/7.
81. Пат. 3508061 (США).
82. Пат. 3856404 (США).
83. Пат. 94905 (ГДР).
84. Пат. 64065 (ПНР).
85. Osborne W. E. Infrared system detects intruders. — Electronics, 1963, vol. 36, № 33, p. 16—19.
86. Пат. 3543110 (США).
87. Schuringa A. A constant shearing stress viscometer. — J. Phys. (J. Scient. Instrum.), 1969, № 12, p. 1093—1094.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Принципы построения и схемы фотореле	4
Общие принципы построения, структура и классификация фотореле	4
Характеристики фотореле и требования, предъявляемые к ним	6
Фотореле на фотоэлементах с внешним фотоэффектом и фотоумножителях	8
Фотореле на фоторезисторах	11
Фотореле на фотодиодах	15
Фотореле на фототранзисторах	17
Фотореле на фототиристорах	18
Расчет фотореле	19
Глава вторая. Функции фотореле в системах автоматики	25
Фотоэлектрические пороговые устройства для индикации предельных значений контролируемых и регулируемых параметров	25
Фотоэлектрические счетные устройства	27
Фотоэлектрические логические элементы	29
Фотоэлектрические коммутаторы	30
Фотоэлектрооптические усилители	32
Фотоэлектрические генераторы	33
Фотоэлектрические запоминающие устройства	35
Фотоэлектрические считывающие устройства	35
Фотоэлектрические следящие системы	40
Глава третья. Основные виды фотореле	44
Фотореле геометрических размеров, положений и перемещений	44
Фотореле угловых и линейных скоростей	46
Фотореле ускорений	49
Фотореле деформаций и механических напряжений	51
Фотореле сил	52
Фотореле массы	54
Фотореле давлений	55
Фотореле уровня жидких и сыпучих тел	57
Фотореле скорости и расхода вещества	59
Фотореле концентрации растворов и дисперсных сред	60
Фотореле влажности газов, жидкостей и твердых тел	73
Фотореле вязкости	75
Фотореле температуры	77
Глава четвертая. Примеры применения фотореле в системах контроля, управления и защиты	83
Фотоэлектрические регуляторы параметров технологических процессов	83
Фотоэлектрические системы автоматического контроля и управления процессами механической обработки	87
Фотоэлектрические контрольно-сортировочные автоматы	91
Фотоэлектрические устройства защиты	94
Фотореле в системах автоматизации испытательных стендов	96
Список литературы	100