А.В. ЗАЦАРИННЫЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. В. ЗАЦАРИННЫЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

МОСКВА «НЕДРА» 1976

УДК 528.489 + 528.5 — 52 + 528.088.3

Зацаринный А. В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. М., «Недра», 1976. 247 с.

В книге рассматриваются вопросы автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений при выполнении створных наблюдений, при контроле прямолинейности направляющих конструкций и технологического оборудования, при монтаже и эксплуатации промышленных сооружений. Приводятся оригинальные конструкции автоматических приборов, применяемых в инженерной геодезии, и датчиков.

Описываются высокоточные методы при применении для измерений оптических квантовых генераторов. Излагаются принципы расчета и построения автоматических измерительных систем геодезического назначения, приводятся результаты экспериментальных исследований.

Книга рассчитана на широкий круг геодезистов, научных работников, аспирантов и студентов геодезических вузов и факультетов.

Табл. 7, ил. 160, список лит. — 138 назв.

З $\frac{20701-080}{043(01)-76}$ 97—76

© Издательство «Недра», 1976

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последнее десятилетие характеризуется широким внедрением в практику геодезических измерений полуавтоматических и автоматических измерительных систем, оптических квантовых генераторов и средств электронной счетно-решающей техники.

Автоматизация геодезических измерений и обработки их результатов повышает производительность труда, дает возможность существенно повысить точность, принципиально по-новому организовать измерения.

По этой причине разработкам в области автоматизации геодезических измерений в нашей стране и за рубежом уделяется большое внимание. В СССР уже достигнуты значительные успехи в указанной области и создан целый ряд оригинальных по конструкции высокоточных измерительных приборов и систем. Широкое развитие получили работы по автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Последнее обстоятельство явилось решающим в подготовке материала для настоящей книги.

Книга имеет своей целью познакомить широкий круг геодезистов с основными принципами автоматизации при выполнении высокоточных инженерно-геодезических измерений, обобщить современные методы и средства автоматизации в прикладной геодезии.

Объем настоящей книги не позволил подробно рассмотреть ряд вопросов, связанных со спецификой выполнения высокоточных инженерно-геодезических измерений. Поэтому в книге нашли отражение лишь некоторые из проблем, стоящих перед автоматизацией инженерно-геодезических измерений, и показаны направления развития средств автоматизации в инженерной геодезии.

Книга рассчитана на широкий круг геодезистов и специалистов, занимающихся конструированием новой геодезической аппаратуры, на научных работников, аспирантов и студентов геодезических вузов и факультетов в качестве учебного пособия при изучении соответствующих разделов прикладной геодезии.

В этой связи в книгу включены разделы, посвященные рассмотрению общих свойств элементов и автоматических измерительных систем геодезического назначения, подробно рассмотрены особенности датчиков и источников оптического излучения, применяемых для высокоточного определения линейных и угловых смещений.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить В. Д. Большакова, В. С. Усова, М. Д. Кращина, И. А. Науменко и В. К. Осипова за ценные советы и указания при написании книги.

ВВЕДЕНИЕ

Под автоматизацией производства в широком смысле понимается процесс, при котором функции измерения передаются приборам и автоматическим устройствам.

Автоматизация производства не означает безусловное, полное вытеснение человека автоматами, но направленность его действий, характер его взаимоотношения с машинами изменяются, труд приобретает новую качественную окраску, становится более сложным и содержательным. Центр тяжести в его трудовой деятельности перемещается на техническое обслуживание автоматов и на аналитически-распорядительную деятельность [11].

В настоящее время существует чрезмерно большое разнообразие автоматических систем, выполняющих те или иные функции по управлению самыми различными физическими процессами во всех областях техники. В этих системах сочетаются весьма разнообразные по конструкции механические, электрические и другие устройства, составляющие в общем сложный комплекс взаимодействующих друг с другом звеньев.

Современное развитие науки и техники вызвало необходимость создания уникальных инженерных сооружений — ускорителей элементарных частиц, высокоточных направляющих путей конвейерных линий большой протяженности, высотных сооружений башенного типа, мощных гидротехнических сооружений и др.

Сооружение и эксплуатация таких промышленных объектов потребовали разработки и создания новой методики высокоточных инженерно-геодезических измерений.

Выполнение комплекса высокоточных геодезических измерений на уникальных объектах часто сопряжено со значительными трудностями, так как по условиям работы требуется выполнять монтажные, юстировочные и измерительные операции в ограниченные промежутки времени. Это обстоятельство требует высокой производительности измерений. Кроме того, часто на уникальных инженерных сооружениях не представляется возможным выполнять необходимый комплекс измерений общепринятыми методами по причине повышенной опасности для людей. Здесь, в первую очередь, следует отметить такие факторы, как радиоактивность, высокие температуры, сильные магнитные и электри-

ческие поля. В этих условиях необходимо применять специальные методы, позволяющие процесс измерений вести дистанционно.

Практика высокоточных геодезических измерений на уникальных сооружениях показала, что дальнейшее повышение точности, существенное увеличение производительности труда прямо связано с применением в инженерной геодезии современных автоматических измерительных систем.

Опыт создания и применения новых геодезических приборов, основанных на использовании достижений оптики, электроники, автоматики, физики показал их широкие возможности и перспективность.

Внедрение автоматизации в инженерно-геодезические работы позволило успешно решить следующие основные задачи:

повысить точность измерений;

осуществить дистанционное наблюдение за объектами;

повысить производительность труда;

существенно снизить затраты на выполнение работ.

Глава I

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Природа физических явлений, измеряемых при выполнении инженерно-геодезических работ, чрезвычайно разнообразна: деформации сооружений и элементов конструкций, направляющих путей, рефракция и флуктуации оптического луча в атмосфере и пр.

Однако независимо от задачи измерения, построение любой автоматической измерительной системы выполняется в соответствии с определенными принципами. Изучение принципов построения автоматических измерительных систем осуществляют на основе теории автоматического управления (ТАУ).

Наиболее общим понятием в теории автоматического управления следует считать термин «система автоматического управления» (САУ).

Системы автоматического управления в широком смысле охватывают как замкнутые системы (с обратной связью), так и незамкнутые (с разомкнутой главной цепью). САУ включают в себя следящие системы, системы автоматического регулирования, автоматические измерительные системы и охватывают, кроме того, ряд систем, которые не могут быть отнесены полностью ни к следящим системам, ни к системам автоматического регулирования или к автоматическим измерительным системам.

При изучении основных положений теории автоматического управления основное внимание уделяется не техническим свойствам отдельных элементов, а функциям, которые они выполняют в системе управления, и характеру связей между ними, поэтому различают блок-схемы, функциональные и структурные схемы.

Блок-схема характеризует систему по составу входящих в нее отдельных конструктивных блоков (блок питания, блок вычитания и пр.).

Функциональная схема дает наглядное представление о функциях отдельных элементов САУ и характере связей между ними.

Все автоматические системы можно условно разделить на два больших класса:

автоматы, выполняющие определенного рода операции как одноразовые, так и многоразовые;

автоматические системы, которые в течение достаточно длительного времени нужным образом изменяют или поддерживают какие-либо физические величины в управляемом процессе.

Эти системы, в свою очередь, делятся на замкнутые и незамкнутые автоматические системы.

Общая функциональная схема незамкнутой системы приведена на рис. 1. Это простейшая полуавтоматическая система управления, так как источником воздействия в ней является человек.

Если источником воздействия является изменение каких-либо внешних условий (например давления, температуры, освещенности), в которых работает данная система, то такая система управления является автоматической.

Рис. 1. Схема незамкнутой системы

Рис. 2. Схема замкнутой системы

Характерно, что в любой незамкнутой автоматической системе процесс работы системы не зависит непосредственно от результатов ее воздействия на управляемый объект.

Для получения замкнутой системы управления в разомкнутую систему на выходе включают контрольные приборы, результаты измерений которых подают на вход автоматической системы, причем величина воздействия определяется по тому, насколько отличаются измеренные величины на управляемом объекте от требуемых значений.

В наиболее компактной форме функциональная схема замкнутой системы представлена на рис. 2.

Рассмотрим работу развернутой функциональной схемы замкнутой системы (рис. 3). На объект управления (управляемый объект), находящийся под влиянием внешнего возмущающего воздействия F, поступает управляющее воздействие $x_р$, являющееся выходной величиной управляющей части автоматической системы. Устройство формирования команд (преобразующий элемент), усилительное устройство и исполнительное устройство образуют основной контур системы.

Замыкается контур управления подачей по цепи главной обратной связи, включающей в себя измерительное устройство и устройство предварительной обработки информации, управляемой величины.

Задающее воздействие $x_з$, поступающее на устройство сравнения, может отличаться от входной величины $x_{вх}$ масштабом, содержать в себе наряду с полезным входным сигналом и случайные возмущения (помехи, шумы), которые могут быть связаны друг с другом определенной зависимостью.

Замкнутые автоматические системы существуют в технике в виде различных автоматических систем управления: автоматического регулирования, следящих систем, вычислительных систем, компенсационных систем измерения и др.

Система автоматического регулирования (САР) представляет собой устройство автоматического управления, предназначенное для изменения по заданным условиям какой-либо величины с помощью специально для этой цели присоединяемых приборов — автоматических регуляторов.

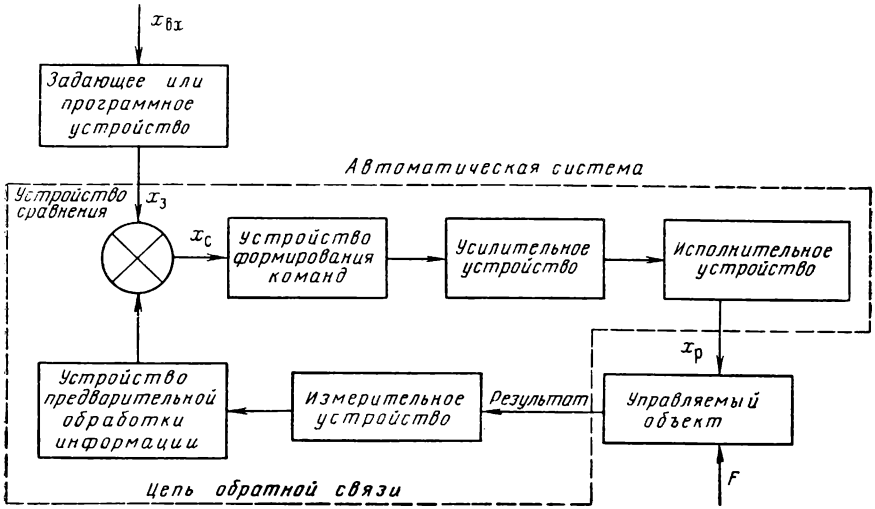


Рис. 3. Развернутая схема замкнутой системы

В отличие от САР следящая система представляет собой устройство автоматического управления, предназначенное для воспроизведения величины, меняющейся по произвольному закону. Следящая система автоматически воспроизводит заданное воздействие, меняющееся по любому произвольному закону, заранее неизвестному (например, перемещение на заданную величину), как правило, без механической связи между задающим и исполнительным элементами.

Вне зависимости от структуры следящая система является замкнутой системой автоматического управления, т. е. системой, имеющей обратную связь.

Особенностью следящих систем является высокая точность передачи сигнала по цепи главной обратной связи. В следящей системе передача сигнала к элементу сравнения осуществляется с коэффициентом, равным единице. На функциональной схеме такая обратная связь изображается одной линией.

Классификацию автоматических систем можно производить по различным направлениям, это связано со сложной структурой,

различной физической сущностью, назначением, областями применения и т. д.

Основным видом классификации, определяющим принцип построения системы, можно считать классификацию по общему назначению системы автоматического управления или по режиму автоматического управления.

Систему автоматического управления можно классифицировать по следующим основным режимам:

автоматического регулирования (система регулирования);

автоматического программного управления или регулирования (системы программного управления или регулирования):

автоматического слежения (следящие системы).

Можно проводить классификацию по типу характеристик отдельных звеньев системы в отношении их линейности. При этом все системы подразделяются на линейные системы и нелинейные.

В свою очередь линейные системы можно подразделить на:

системы с постоянными параметрами (параметры системы не зависят ни от времени, ни от переменных воздействий на эту систему);

системы с переменными параметрами (параметры системы зависят от времени).

Нелинейной называется система, в которой хотя бы один из параметров является величиной нелинейной, зависящей от переменных, характеризующих поведение динамической системы.

Важным направлением является классификация по характеру отработки задаваемого входного воздействия.

В этом случае системы могут быть разделены на:

системы с непрерывной отработкой входного воздействия;

системы с дискретной отработкой входного воздействия.

Одним из важнейших показателей качества работы системы является ее ошибка как статическая, так и динамическая. Поэтому иногда САУ классифицируют по виду функции сигнала ошибки при определенном входном воздействии.

С этой точки зрения для линейных систем автоматического управления выделяют следующие категории систем с нулевой ошибкой:

в статическом состоянии (с ошибкой по скорости);

при постоянной скорости (с ошибкой по ускорению);

при постоянном ускорении (с ошибкой при изменении ускорения).

В теории автоматического управления существуют и другие виды классификации автоматических систем: по степени характеристического уравнения, по физической сущности системы или отдельных ее звеньев, по роду тока (системы переменного и постоянного тока), по областям применения, по мощности исполнительной части и др.

В автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений в настоящее время нашли применение как полуавтомати-

ческие, так и автоматические системы, в том числе замкнутые и разомкнутые, следящие, измерительные компенсационные и др.

Наиболее широко используются в геодезических приборах измерительные компенсационные системы, так как они в сочетании с позиционно-чувствительными датчиками обеспечивают высокую точность измерения.

§ 2. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Любая система автоматического управления, в том числе и геодезического назначения, имеет два режима работы — статический (или установившийся) и динамический. Описание режима работы системы производится с помощью уравнений.

Математически статические свойства системы выражаются алгебраическими уравнениями установившегося режима или уравнениями статики. Графическим отображением уравнения статики является статическая характеристика.

Математически динамические свойства систем автоматического управления записываются дифференциальными (иногда интегро-дифференциальными) уравнениями.

В зависимости от сложности исследуемого физического процесса определяется и вид дифференциального уравнения, описывающего систему. В большинстве случаев при расчетах стремятся реальную систему (которая часто нелинейна) заменить приближенно эквивалентной линейной системой. В линейных системах переходные процессы описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами и такой метод линеаризации позволяет дифференциальные уравнения выразить в операторной форме и представить их в виде передаточных функций.

Система автоматического управления определенным образом реагирует на то или иное воздействие, поданное на ее вход.

Обычно определение вида этой реакции осуществляется путем решения дифференциального уравнения, описывающего поведение системы при данной форме возмущения.

Для линеаризованной системы это уравнение может быть представлено в виде [4]:

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{вых}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{вых}}}{dt^{n-1}} + \ldots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + a_n x_{\text{вых}} =$$

$$= b_0 \frac{d^m x_{\text{вх}}}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_{\text{вх}}}{dt^{m-1}} + \ldots + b_{m-1} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + b_m x_{\text{вх}}, \qquad (1)$$

где $x_{\text{вх}} = x_{\text{вх}}(t)$ — возмущающее воздействие на входе; $x_{\text{вых}} = x_{\text{вых}}(t)$ — реакция на выходе; $a_0, a_1, \ldots, a_n$, $b_0, b_1, \ldots, b_m$ — постоянные коэффициенты, определяемые параметрами системы.

В реальных системах, как правило, $n > m$. В операторной форме данное уравнение записывается в виде

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n)\, x_{\text{вых}} = \\ = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \ldots + b_{m-1} p + b_m)\, x_{\text{вх}}, \qquad (2)$$

где p — символ дифференцирования.

Решение указанного дифференциального уравнения обычными методами достаточно сложно. Использование операторных методов дает возможность заменить действия, связанные с дифференцированием и интегрированием, алгебраическими действиями и исключает необходимость определения произвольных постоянных по заданным начальным условиям.

Наиболее эффективным является решение с применением прямого преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа осуществляется воспроизведением некоторой функции вещественной переменной $f(t)$, роль которой выполняет $x_{\text{вых}}(t)$, с помощью функции $F(S)$ комплексной переменной, и обратного преобразования, позволяющего перейти от функции $F(S)$ к функции $f(t)$.

Уравнение, описывающее прямое преобразование Лапласа, имеет вид

$$F(S) = \int_0^\infty f(t)\, e^{-St}\, dt \qquad (3)$$

и символически представляется выражением

$$F(S) = L[f(t)], \qquad (4)$$

где $F(S)$ — изображение функции $f(t)$, являющееся функцией комплексного аргумента S; $f(t)$ — оригинал изображения.

Это преобразование применимо только для функций, удовлетворяющих условию $f(t) = 0$ при $t < 0$.

В соответствии с правилами преобразований Лапласа прямое преобразование для n-ой производной от некоторой функции времени $x(t)$ имеет вид

$$L\left[\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right] = S^n X(S), \quad \text{если } x(0) = \frac{dx(0)}{dt} = \ldots = \frac{d^{n-1}x(0)}{dt^{n-1}} = 0, \qquad (5)$$

где $X(S)$ — изображение функции $x(t)$; $x(0)$ — начальное значение функции $x(t)$ при $t = 0$; S — комплексная переменная.

Применяя это правило к дифференциальному уравнению (1), получим

$$(a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \ldots + a_{n-1} S + a_n)\, X_{\text{вых}}(S) = \\ = (b_0 S^m + b_1 S^{m-1} + \ldots + b_{m-1} S + b_m)\, X_{\text{вх}}(S) + X_{\text{н}}(S), \qquad (6)$$

где $X_н(S)$ — функция начальных условий; $X_{вых}(S)$, $X_{вх}(S)$ — изображение функций $x_{вых}(t)$, $x_{вх}(t)$.

При анализе работы САУ под влиянием различных воздействий обычно полагают, что до момента появления воздействия система находится в покое или в процессе установившегося движения. При этом условии все производные функции начальных условий будут равны нулю, соответственно член $X_н(S)$ в полученном уравнении исчезнет и уравнение запишется

$$(a_0S^n + a_1S^{n-1} + \ldots + a_{n-1}S + a_n)X_{вых}(S) = \\ = (b_0S^m + b_1S^{m-1} + \ldots + b_{m-1}S + b_m)X_{вх}(S). \quad (7)$$

Сопоставляя уравнение (7) с уравнением (2), можно видеть, что они идентичны. Вследствие этого для сохранения наиболее распространенных обозначений вместо S часто применяют обозначение

$$p = S.$$

Тогда уравнение (7) примет вид

$$X_{вых}(p) = \frac{b_0p^m + b_1p^{m-1} + \ldots + b_{m-1}p + b_m}{a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n} X_{вх}(p). \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\frac{b_0p^m + b_1p^{m-1} + \ldots + b_{m-1}p + b_m}{a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p + a_n} = W(p), \quad (9)$$

тогда

$$X_{вых}(p) = W(p)X_{вх}(p). \quad (10)$$

Величина $W(p)$ носит название передаточной функции системы, которая характеризует свойства анализируемой системы и поэтому может быть названа собственной передаточной функцией.

Передаточная функция, определяющая не только свойства системы, но и характер возмущения, носит название обобщенной передаточной функции.

Таким образом, передаточной функцией звена, участка цепи звеньев или всей системы называется отношение преобразования Лапласа для величины на выходе к преобразованию Лапласа для воздействия на входе при нулевых начальных условиях, т. е.

$$W(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)}. \quad (11)$$

§ 3. ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Математическое описание любой системы автоматического управления основывают на свойствах ее элементов, учитывая при этом выполняемые элементами функции. Однако такое

описание сложно и затрудняет обобщение результатов, полученных при исследовании ряда систем.

Значительное упрощение может быть получено, если исследуемую систему разделить на части — звенья, а каждое звено системы, выраженное линейным дифференциальным уравнением, рассматривать не с точки зрения его физических свойств и выполняемых функций, а с точки зрения реакции звеньев на поданное на его вход внешнее возмущение. В этом случае подавляющее большинство элементов может быть сведено к небольшому числу эквивалентных звеньев, описываемых простыми дифференциальными уравнениями. При этом нелинейные элементы, входящие в систему, учитываются особо. Совокупность таких звеньев совместно с линиями связи между ними, характеризующими их взаимодействие, образует структурную схему САУ.

Применение метода эквивалентных звеньев значительно упрощает методику исследования систем, дает возможность обобщенного теоретического рассмотрения и сравнения свойств различных систем.

Основными типами эквивалентных звеньев являются: безынерционное, апериодическое, интегрирующее, колебательное и дифференцирующее.

1. Безынерционное звено. Безынерционным называется звено, способное изменять величину передаваемого сигнала, но не оказывающее влияния на характер его изменения во времени.

Пример такого звена — электронный усилитель, для которого с достаточной степенью точности можно записать

$$U_{\text{вых}}(t) = kU_{\text{вх}}(t),$$

где $U_{\text{вх}}(t)$, $U_{\text{вых}}(t)$ — напряжение на входе и выходе системы соответственно; k — коэффициент пропорциональности, называемый статическим коэффициентом усиления.

Аналогичное равенство может быть записано и для других усилительных элементов: рычажных и зубчатых передач, потенциометров и др.

Поэтому для безынерционного звена имеем уравнение

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t); \tag{12}$$

передаточная функция такого звена $W(p) = k$.

2. Апериодическое звено. Дифференциальное уравнение переходного режима для апериодического звена может быть записано

$$T\dot{x}_{\text{вых}}(t) + x_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t), \tag{13}$$

где T — постоянная времени.

Для апериодического звена передаточная функция запишется

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1}. \tag{14}$$

В установившемся режиме $dx_{\text{вых}}(t)/dt = 0$ и передаточная функция в этом случае принимает вид $W(p) = k$.

Примером апериодического звена является электрическая цепь, содержащая катушку индуктивности, подключенную к источнику постоянного тока.

3. Интегрирующее звено. Интегрирующее звено описывается дифференциальным уравнением

$$T\dot{x}_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t). \tag{15}$$

В общем случае уравнение передаточной функции звена имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{Tp}. \tag{16}$$

Примерами интегрирующих звеньев являются: операционный усилитель в режиме интегрирования, интегрирующие приводы, например вал исполнительного двигателя, если за функцию входа принять скорость вращения, а за функцию выхода — угол поворота.

4. Колебательное звено. Изменение величины на выходе колебательного звена при внезапном приложении к его входу постоянного по величине возмущения характеризуется рядом колебаний, что и определяет название этого звена.

Уравнение переходного режима колебательного звена, характеризуемого затухающими колебаниями на выходе, запишется как

$$T^2\ddot{x}_{\text{вых}}(t) + 2cT\dot{x}_{\text{вых}}(t) = kx_{\text{вх}}(t), \tag{17}$$

где c — коэффициент относительного затухания.

В общем виде передаточная функция такого звена имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{T^2p^2+2cTp+1}. \tag{18}$$

Колебательными звеньями могут быть, например, контуры, составленные из емкостей, индуктивностей и сопротивлений, и некоторых других элементов.

В зависимости от значения коэффициента c колебательные звенья могут быть: устойчивыми ($c < 1$), неустойчивыми ($c \geqslant 1$), консервативными ($c = 0$). Для консервативного звена

$$W(p) = \frac{k}{T^2p^2+1}. \tag{19}$$

Колебания на выходе консервативного звена имеет постоянную амплитуду и не затухают с течением времени.

5. Дифференцирующие звенья. Их дифференциальные уравнения:

$$x_{\text{вых}}(t) = T\dot{x}_{\text{вх}}(t); \tag{20}$$

$$x_{\text{вых}}(t) = T\dot{x}_{\text{вх}}(t) + x_{\text{вх}}(t); \tag{21}$$

$$x_{\text{вых}}(t) = T^2\ddot{x}_{\text{вх}}(t) + 2cT\dot{x}_{\text{вх}}(t) + x_{\text{вх}}(t), \tag{22}$$

при $c < 1$.

Уравнения (20) и (21) определяют дифференцирующие звенья первого порядка; уравнение (22) — звено второго порядка.

Название этих звеньев определяется выходной величиной, которая зависит не только от входной величины, но и от ее производных.

Элементы, обладающие свойствами дифференцирующих звеньев, находят применение в корректирующих звеньях систем автоматического управления.

Передаточные функции дифференцирующих звеньев соответственно имеют вид

$$W(p) = Tp; \quad W(p) = Tp + 1; \quad W(p) = T^2p^2 + 2cTp + 1. \tag{23}$$

Знание передаточных функций типовых звеньев и методов их составления позволяет получать передаточные функции большинства звеньев, составляющих структурные схемы систем автоматического управления.

§ 4. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О СТРУКТУРНЫХ СХЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

При замене элементов САУ типовыми эквивалентными звеньями возникает возможность упрощенного изображения схемы системы автоматического управления; в этом случае вычерчиваются только условные обозначения типовых звеньев, заменяющих отдельные участки схемы. Такие схемы носят названия структурных.

Структурная схема САУ, как и функциональная схема, отражает процесс передачи и обработки информации в замкнутом контуре системы автоматического управления и математически описывает динамические свойства системы. Структурные схемы дают более полное представление о процессах, происходящих в исследуемой системе. Эквивалентные звенья изображаются в виде прямоугольников, в которых отмечаются функции, характеризующие данные звенья, или проставляется знак, определяющий направление действия звена.

Наиболее простые САУ, например следящие системы, образуют замкнутый контур.

Следящие системы, обладающие структурной схемой, представленной на рис. 4, называются одноконтурными.

Для повышения качества работы одноконтурные автоматические системы часто снабжают одной или несколькими дополнительными параллельными связями, что превращает их в многоконтурные. В зависимости от назначения, характера действия и способа включения связи разделяются на: главные и дополнительные, прямые и обратные, положительные и отрицательные, жесткие и гибкие, простые и перекрещивающиеся, внешние и внутренние [14].

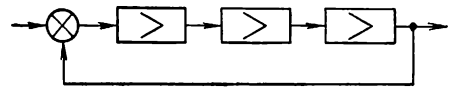


Рис. 4. Схема следящей системы

Главная связь обеспечивает замыкание цепи основного контура системы автоматического управления.

Дополнительные связи представляют собой параллельные контуры, охватывающие часть звеньев основного контура.

Если сигнал, идущий по дополнительной параллельной связи, суммируется с основным сигналом на выходе группы звеньев основного контура, охваченных дополнительной связью, то связь называется прямой.

Если сигнал, идущий по дополнительной параллельной связи, подается с выхода на вход группы звеньев основного контура, охваченных дополнительной связью, то связь называется обратной.

б

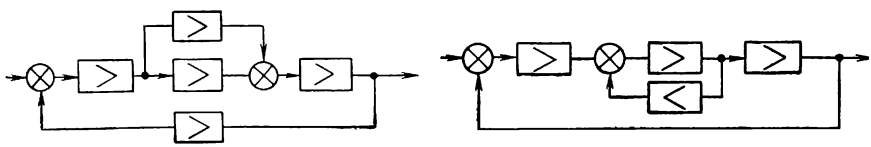


Рис. 5. Схемы САУ с дополнительной обратной связью

Если сигнал связи суммируется с основным сигналом, связь называется положительной, если вычитается — отрицательной.

Структурная схема участка следящей системы с прямой связью представлена на рис. 5, *а*, и с дополнительной обратной связью на рис. 5, *б*.

Если контур обратной связи не содержит элементов, изменяющих характер выходного сигнала, то связь называется жесткой, в противном случае — гибкой.

Главная обратная связь следящей системы всегда является жесткой.

Передаточную функцию участка цепи при последовательном соединении звеньев $W_1(p)$; $W_2(p)$; . . . $W_n(p)$ можно получить, если исключить промежуточные переменные величины. Уравнение

ее запишется в виде произведения передаточных функций звеньев участка

$$W(p)=\frac{x_1(p)}{x_0(p)}\,\frac{x_2(p)}{x_1(p)}\,\frac{x_3(p)}{x_2(p)}\cdots\frac{x_n(p)}{x_{n-1}(p)}=W_1(p)\,W_2(p)\ldots W_n(p). \tag{24}$$

Таким образом, передаточная функция участка цепи при последовательном соединении звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев участка

$$W(p)=\prod_{i=1}^{i=n} W_i(p). \tag{25}$$

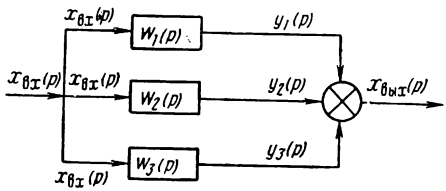


Рис. 6. Параллельное включение звеньев САУ

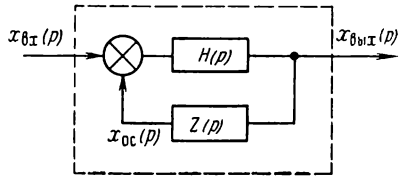


Рис. 7. Схема САУ с обратной отрицательной связью

Параллельным согласным включением звеньев направленного действия называется такое включение, при котором входная величина системы подается параллельно на входы всех звеньев, а их выходные величины алгебраически суммируются на выходе системы (рис. 6)

$$x_{вых}(p)=Y_1(p)+Y_2(p)+\ldots+Y_n(p)=$$
$$=x_{вх}(p)\,[W_1(p)+W_2(p)+\ldots+W_n(p)];$$

$$x_{вых}(p)=x_{вх}(p)\sum_{i=1}^{i=n} W_i(p); \tag{26}$$

$$\frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)}=\sum_{i=1}^{i=n} W_i(p). \tag{27}$$

Таким образом, передаточная функция параллельных согласно включенных звеньев направленного действия равняется алгебраической сумме передаточных функций отдельных звеньев.

Рассмотрим передаточные функции параллельно и встречно включенных звеньев — отрицательная обратная связь — как наиболее часто встречающийся случай. Структурная схема автоматической системы с отрицательной обратной связью изображена на рис. 7.

$$x_{вых}(p)=[x_{вх}(p)-x_{ос}(p)]\,H(p); \tag{28}$$

$$x_{ос}(p)=x_{вых}(p)\,Z(p); \tag{29}$$

$$x_{вых}(p) = x_{вх}(p) H(p) - x_{вых}(p) Z(p) H(p);$$

$$\frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{H(p)}{1 + H(p) Z(p)} = \frac{H(p)}{1 + W(p)}, \qquad (30)$$

где $W(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой системы автоматического управления равняется отношению передаточной функции прямой цепи к увеличенной на единицу передаточной функции разомкнутой системы.

Для САУ с положительной обратной связью передаточная функция имеет вид

$$\frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{H(p)}{1 - W(p)}. \qquad (31)$$

В действительности, кроме управляющего входного воздействия, всякая реальная система подвержена различным возмущающим воздействиям (нестабильность характеристик элементов, помехи и т. д.), которые могут поступать в систему в любом месте. Для учета их влияния устанавливают зависимости между этими возмущениями и изменениями управляемой (выходной) величины системы. В соответствии с правилами теории автоматического управления операторное изображение выходной величины системы равняется дроби, числитель которой есть произведение изображения внешнего воздействия на передаточные функции звеньев, включенных последовательно между точкой приложения воздействия и выходом системы, а знаменатель — увеличенная на единицу передаточная функция разомкнутой системы.

При проектировании и расчете автоматических измерительных систем геодезического назначения и их отдельных элементов (усилителей, регистраторов и т. д.) в полной мере используют методы расчета теории автоматического управления, достаточно подробно изложенные в специальной литературе [14, 73, 98].

§ 5. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Частотные характеристики получили исключительно широкое использование при анализе динамических свойств и синтезе систем автоматического управления и отдельных их элементов.

Выражения для частотных характеристик отдельных звеньев системы легко могут быть получены из соответствующих передаточных функций путем замены оператора p на $j\omega$.

Физически частотная характеристика замкнутой или разомкнутой системы соответствует подаче на вход системы гармонического воздействия при изменении его частоты от 0 до ∞ и сохранении постоянной амплитуды входного сигнала на всем диапазоне изменения частот.

При подаче на вход системы гармонического сигнала $x_{вх}(t) = x_{гх}(t)_{max} \sin \omega t$ система будет находиться в режиме вынужденных колебаний. Отношение

$$\frac{x_{гх}(t)_{max}}{x_{вых}(t)_{max}} e^{j\varphi(\omega)} = \Phi(j\omega)$$

представляет собой комплексную частотную функцию [14].

Выражение для $\Phi(j\omega)$ может быть разделено на действительную и мнимую части:

$$\Phi(j\omega) = p(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (32)$$

где $p(\omega)$; $Q(\omega)$; $A(\omega)$; $\varphi(\omega)$ — полиномы от ω.

При изменении частоты ω амплитуда и фаза вектора $\Phi(j\omega)$ будут изменяться, а его конец описывать на плоскости комплексного переменного кривую, представляющую собой амплитудно-фазовую характеристику замкнутой системы.

В соответствии с принятыми обозначениями:

$p(\omega)$ — действительная частотная характеристика замкнутой системы;

$Q(\omega)$ — мнимая частотная характеристика замкнутой системы;

$A(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы;

$\varphi(\omega)$ — фазовая частотная характеристика замкнутой системы.

Соотношения между ними определяются выражениями

$$\left.\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{p^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{p(\omega)} \\ p(\omega) &= A(\omega) \cos \varphi(\omega); \quad Q(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega) \end{aligned}\right\}. \quad (33)$$

Частотные характеристики позволяют без решения дифференциального уравнения судить о поведении системы в отношении устойчивости и ряда показателей качества, а также определять и рассчитывать средства коррекции системы и отдельных ее элементов для получения заданных динамических показателей.

Амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы представляет собой изменение модуля вектора $W(j\omega)$ в зависимости от частоты, а фазово-частотная — изменение аргумента вектора $W(j\omega)$ от частоты входного сигнала ω.

Амплитудно- и фазово-частотные и амплитудно-фазовую характеристики звеньев получают из их передаточной функции.

Так, заменяя в передаточной функции p на $j\omega$, получают выражение для амплитудно- и фазово-частотных характеристик. Подставляя числовые значения параметров звена, вычисляют $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для различных ω. По результатам вычислений строятся характеристики.

Для получения амплитудно-фазовой характеристики $W(j\omega)$ представляют в виде действительной и мнимой частей

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) \quad (34)$$

и строят графики для различных значений ω.

Подобные характеристики могут быть построены как для замкнутой, так и для разомкнутой систем, для отдельных звеньев или системы в целом.

Наибольшее использование получили логарифмические частотные (амплитудные и фазовые) характеристики, позволяющие производить анализ и синтез системы наиболее простым способом [73].

Изложенное выше об автоматических системах предполагало, что эти системы устойчивы, т. е. они возвращаются в исходное установившееся состояние после прекращения действия возмущений, которые вывели систему из этого состояния.

Однако не все системы устойчивы. В сложных системах (поведение которых описывается дифференциальными уравнениями третьего порядка и выше) для обеспечения устойчивости необходимо вполне определенное соотношение между параметрами системы.

Для оценки устойчивости САУ разработан ряд критериев, среди которых наибольшее распространение имеют алгебраический критерий Рауса — Гурвица и частотные критерии Михайлова и Михайлова — Найквиста.

Так критерий Найквиста основан на рассмотрении амплитудно-фазовой характеристики $W(j\omega)$ разомкнутой системы, по виду которой можно судить об устойчивости замкнутой системы. Это обусловлено наличием однозначной зависимости между передаточной функцией $W(p)$ разомкнутой системы и характеристическим уравнением замкнутой системы, которое получается, если приравнять к нулю знаменатель передаточной функции замкнутой системы.

Согласно критерию Найквиста, если разомкнутая система устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика $W(j\omega)$ не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$. В свою очередь разомкнутая система устойчива, если ее характеристическое уравнение не имеет корней с положительной действительной частью (но может иметь нулевые корни) [14].

При исследовании устойчивости САУ может ставиться задача не только проверки устойчивости системы при заданных значениях ее параметров, но и определения некоторой области изменения отдельных параметров, внутри которых система остается устойчивой.

Эффективность применения того или иного способа определения устойчивости в сильной степени зависит от конкретного содержания решаемой задачи.

В соответствии с общими понятиями, изложенными в данной главе, можно указать примерный порядок расчета системы автоматического управления геодезического назначения.

На основании технического задания создают блок-схему, функциональную схему и выбирают основные элементы системы

автоматического управления (исполнительные механизмы, усилители, датчики и др.):

определяют передаточную функцию некорректированной системы;

строят логарифмические частотные характеристики и определяют устойчивость системы;

получают логарифмическую амплитудно-частотную характеристику корректирующих звеньев, графически вычитая из желаемой характеристики исходную;

определяют вид корректирующих звеньев и места их включения;

определяют передаточную функцию скорректированной системы;

строят логарифмическую амплитудно-частотную характеристику скорректированной системы и определяют устойчивость системы;

строят кривые переходного процесса в системе;

определяют качественные показатели САУ (запас устойчивости по амплитуде и фазе, максимальное перерегулирование, продолжительность переходного процесса, число колебаний).

Непрерывное повышение требований к современным измерительным системам в части точности, быстродействия, диапазона изменения величин и параметров приводит к существенному усложнению систем. Становится необходимым учитывать тонкие структуры изучаемых процессов, что требует более полного и точного их математического описания. При этом обнаруживается возрастающее несоответствие возможностей теоретических методов исследования и проектирования автоматических систем с практическими потребностями.

Аналитические методы расчета САУ разработаны достаточно полно и доведены до уровня инженерных расчетов лишь для линейных систем. Однако и здесь возрастание порядка дифференциальных уравнений, определяющих поведение системы управления, резко снижает эффективность теоретических расчетов вследствие их большой трудоемкости.

Для нелинейных же систем и процессов нет общего математического аппарата и обычно приходится довольствоваться частными исследованиями, относящимися к учету влияния тех или иных нелинейностей на поведение соответствующих линеаризованных систем управления.

Поэтому во многих случаях приходится обращаться к экспериментальной доработке и отладке опытных образцов аппаратуры управления в натурных условиях. Однако метод экспериментального исследования на реальных установках обладает рядом принципиальных недостатков, из которых главными являются: большие затраты труда и времени, высокая стоимость изготовления и испытания экспериментальных образцов.

В связи с изложенным, сейчас все более широкое применение в инженерной практике получает метод математического модели-

рования, который может рассматриваться как своеобразный вид экспериментального исследования САУ.

В основу этого метода положено понятие о математической модели исследуемого процесса. Под математической моделью понимается совокупность сведений, используемых в качестве математического описания процесса управления, заданных в виде аналитических зависимостей (например, системы дифференциальных уравнений), таблиц, графиков и др. [14].

Метод моделирования предусматривает воспроизведение (реализацию) исследуемого процесса, заданного его математической моделью, в виде искусственно создаваемого в специальной моделирующей установке физического процесса, подобного и аналогичного исследуемому процессу с точки зрения динамики управления.

Моделирование САУ в настоящее время производится почти исключительно при помощи математических моделирующих устройств (аналоговых вычислительных машин). В последние годы начали успешно развиваться работы по моделированию САУ на цифровых вычислительных машинах, обладающих рядом преимуществ, особенно важных при исследовании сложных систем и процессов, требующих выполнения большого числа логических операций, учета статистических факторов и т. п.

§ 6. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Автоматические измерительные системы геодезического назначения могут иметь достаточно сложную структуру и содержать усилители, различные исполнительные элементы и механизмы, регистрирующие и информационные устройства. Например, следящие оптико-электронные системы включают в себя фотоприемники, усилители электрического сигнала, оптико-механические компенсаторы, редукторы, исполнительные электродвигатели, интегрирующие и другие устройства и механизмы. Кроме того, для повышения помехозащищенности, удобства выделения информации об угловых или линейных перемещениях объектов исследования в измерительных системах осуществляют модуляцию полезного сигнала. В результате первичная информация об объекте исследования поступает на вход электрической части системы в виде напряжения несущей частоты, модулированной управляющей частотой.

Для получения информации об объекте исследования, обеспечения заданной функциональной работоспособности исполнительных и регистрирующих устройств электронная часть измерительной системы должна содержать соответствующие функциональные блоки-усилители, демодуляторы, логические схемы управления, детекторы и т. д.

Электронное устройство осуществляет вторичную обработку информации и позволяет получить результат измерения в форме, удобной для записи или регистрации.

Усилители электрических сигналов осуществляют усиление сигналов, поступающих с чувствительного элемента и имеющих, как правило, мощность, недостаточную для управляющего воздействия.

Выбор усилительных элементов определяется: требуемой выходной мощностью сигнала, коэффициентом усиления, родом напряжения сигнала, ожидаемыми внешними воздействиями (температура, влажность окружающей среды и пр.), требованиями надежности, условиями обслуживания и др.

Методика расчета и проектирования усилителей электрических сигналов достаточно подробно описана в специальной литературе [117, 118]. Поэтому здесь рассмотрим лишь некоторые вопросы, связанные с использованием усилителей в геодезических приборах.

Различают усилители постоянного тока, предназначенные для усиления немодулированного сигнала; усилители переменного тока, предназначенные для усиления гармонического сигнала; импульсные усилители.

Одним из важных требований, предъявляемых к усилителям электрического сигнала, является требование сохранения формы усиливаемого сигнала (линейные и нелинейные искажения).

Линейные искажения обусловлены в усилителе наличием реактивных элементов — емкостей и индуктивностей. Для оценки линейных искажений в усилителях используют амплитудно- и фазово-частотные характеристики, устанавливающие зависимость изменения коэффициента усиления и фазы от изменения частоты электрического сигнала. Под полосой пропускания электронного усилителя понимают диапазон частот $f_н \div f_в$ между нижней $f_н$ и верхней $f_в$ граничными частотами усилителя, при которых усиление отклоняется на заданную величину от усиления, принятого за номинальное (до уровня 0,707 по напряжению или току).

По полосе пропускания усилители разделяют на избирательные и широкополосные.

Нелинейные искажения в усилителях обусловлены наличием в усилителе элементов с нелинейными характеристиками. Поэтому при усилении сигналов гармонической формы сигнал на выходе усилителя имеет несинусоидальную форму. В выходном сигнале помимо основной гармоники, имеющей частоту входного сигнала, будут присутствовать гармоники высшего порядка.

Усиление переменного электрического сигнала с минимальными нелинейными искажениями можно получить, если усилитель будет представлять собой линейный четырехполюсник. Такой характеристикой в наибольшей степени приближения обладает усилитель на сопротивлениях, в силу чего он является основным

типом усилителя для автоматических приборов геодезического назначения.

Коэффициент усиления усилителя, а следовательно, и число его каскадов выбирают в зависимости от мощности сигнала датчика, мощности исполнительных элементов измерительной системы и уровня допустимых искажений и шумов.

Для получения стабильного коэффициента усиления по всей полосе частот проводят коррекцию частотных характеристик каскадов усилителя на основе исследования его амплитудно-частотных характеристик.

Во многих случаях усилитель автоматической аппаратуры геодезического назначения должен работать в условиях изменения мощности входного сигнала в широких пределах, например при изменении мощности светового потока, приходящего на измерительное устройство из-за изменения метеоусловий на трассе распространения оптического луча и т. д. В этом случае в схему усилителя необходимо вводить устройство автоматического регулирования усиления (АРУ) или устройство автоматической регулировки чувствительности (АРЧ).

Под воздействием АРУ изменяется коэффициент усиления усилителя пропорционально увеличению крутизны входного сигнала.

Сигнал, снимаемый с датчика, часто содержит не только полезную информацию, но и различного рода помехи. Помехи, кроме того, порождает и сам усилитель. Для селекции полезного сигнала от помех в автоматических измерительных геодезических системах применяют различные методы. Одним из наиболее эффективных и простых из них является использование узкополосного усилителя. Избирательность в усилителях достигается за счет введения частотно-зависимой отрицательной обратной связи.

Отрицательная обратная связь в усилителях может быть применена и для изменения ряда характеристик усилителя: повышения стабильности усиления, снижения уровня нелинейных искажений и собственных шумов и т. д. [6].

Не останавливаясь на принципах построения управляющих схем и электронных устройств автоматики, подробно рассмотренных в специальной литературе [113, 95, 91], укажем лишь, что точность и надежность работы геодезической измерительной системы во многом определяется построением структурной схемы ее электронной части, правильным и рациональным выбором элементов, в том числе и регистрирующего устройства.

Регистрирующее устройство является конечным звеном любой автоматической измерительной системы.

В зависимости от назначения автоматической системы и конкретно решаемой задачи автоматические регистраторы могут выполняться в двух вариантах: в виде различных аналоговых или дискретных приборов, в том числе цифропечатающих и

систем записи информации на магнитной ленте, или в виде систем отображения информации.

К приборам первой группы относятся самопишущие вольтметры, амперметры, ваттметры, различные перфораторы, цифропечатающие устройства и др.

Такие устройства в автоматических измерительных системах целесообразно применять в случае изучения быстропротекающих во времени процессов, для регистрации физических процессов в течение длительного времени, для набора статистических данных или с целью автоматизации процесса обработки информации на ЭВМ.

Однако в ряде случаев эффективное и надежное использование автоматических систем возможно только при условии активного участия человека в процессе управления на любом этапе работы автоматической системы. Этого можно достичь, создав специальные надежные средства выдачи информации в форме, пригодной для восприятия человеком. Такие устройства одновременно являются и регистраторами.

Отображение информации в современных автоматических измерительных системах может осуществляться с помощью различных индикаторных устройств, табло, мнемосхем, планшетов и т. д.

Под элементами индикации понимают устройства и приборы, преобразующие электрические сигналы в визуальную информацию в форме, наиболее пригодной для зрительного восприятия человека и удовлетворяющей целям и потребностям его деятельности [41].

Для отображения состояния системы «работает», «включено», «стоп» и т. п. в автоматических устройствах обычно применяют лампы накаливания или газоразрядные индикаторы.

Для отображения количественных показателей применяют различные счетные устройства — цифровые индикаторы (вакуумные, газоразрядные, электролюминесцентные).

При выборе и создании устройств индикации и отображения информации следует учитывать не только технологические и экономические соображения, но и факторы человеческого восприятия. По содержанию и количеству информации, по форме и композиции информационные устройства должны соответствовать задачам, поставленным перед оператором, и его возможностям по приему и переработке информации.

Грамотное и рациональное построение информационных устройств на современном этапе развития техники возможно только на основе учета инженерно-психологических требований.

Глава II

ДАТЧИКИ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ

§ 7. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для автоматического измерения физических величин при выполнении инженерно-геодезических работ могут использоваться разные виды датчиков.

Датчиками называют преобразователи контролируемой величины в величину, удобную для дистанционной передачи и дальнейшей обработки. Датчики различают по роду энергии и физическим величинам, подаваемым на его вход и получаемым на выходе, по принципу действия и конструкции.

Большинство датчиков делят на два основных класса: параметрические и генераторные [23].

В параметрических датчиках при изменении входной величины изменяются параметры схемы датчика, в результате чего возникают изменения выходной величины. Для работы таких датчиков необходим внешний источник энергии. К параметрическим датчикам относятся реостатные, индуктивные, емкостные и др.

В генераторных датчиках происходит непосредственное преобразование одного вида энергии в другой. К генераторным датчикам относятся фотоэлектрические датчики, термопары, пьезодатчики и др.

Датчик может иметь простую или сложную структурную схему, содержать один-два или несколько конструктивных элементов, каждый из которых может являться элементарным преобразователем.

Основным элементом любого датчика является чувствительный (воспринимающий) элемент, первым воспринимающий измеряемую величину и преобразующий ее к виду, удобному для дальнейшей обработки.

Основные характеристики датчика:

1) статическая характеристика — зависимость выходной величины $x_{вых}$ от входной $x_{вх}$ при установившемся режиме

$$x_{вых} = F(x_{вх}); \tag{35}$$

2) крутизна

$$k = \frac{dx_{вых}}{dx_{вх}}; \tag{36}$$

3) мощность на выходе датчика $P_{вых}$,

4) мощность на входе датчика $P_{вх}$.

Порогом чувствительности датчика называется минимальное изменение входной величины, которое может быть воспринято последующими элементами измерительной схемы и вызвать изменение полезного выходного сигнала.

Статическая характеристика датчика обычно задается аналитически или графически; она характеризует связь между выходной величиной $x_{вых}$ и входной $x_{вх}$. По виду статической характеристики датчики разделяют на датчики с линейной, нелинейной и релейной характеристиками. Классификацию датчиков можно проводить по назначению, принципу действия, линейности их характеристик и т. д. Примеры статической характеристики датчиков показаны на рис. 8.

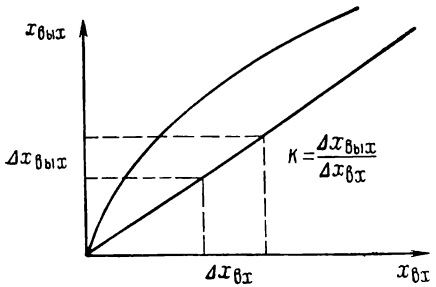


Рис. 8. Статические характеристики датчиков

В настоящее время в технике используется чрезвычайно широкое разнообразие датчиков для определения перемещений и угла поворота, определения моментов вращения, размеров, уровня, ускорения, параметров вибраций, давления, расхода жидкостей и газа и др.

Датчики по принципу действия и назначению могут быть разделены на классы [3]:

омические датчики (реостатные, жидкостные электролитические, контактного сопротивления, тензодатчики и др.);

индуктивные и трансформаторные датчики перемещения;

магнитомодуляционные датчики;

емкостные и пьезоэлектрические датчики;

радиационные, акустические и термические датчики перемещения (оптические, радиоизотопные, фотоэлектрические и др.);

пневматические и гидравлические датчики;

компенсационные датчики, датчики с время-импульсным и частотным выходом, цифровые датчики перемещения и угла поворота;

датчики скоростного напора, расхода и др.

Для автоматизации инженерно-геодезических измерений с успехом могут быть применены многие из перечисленных типов датчиков. Среди них в первую очередь следует назвать потенциометрические, индуктивные, емкостные, фотоэлектрические, датчики, основанные на использовании муарового эффекта и др.

§ 8. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Реостаты с ползунком, применяемые в автоматике для преобразования перемещений в электрическое напряжение, называют потенциометрами или потенциометрическими датчиками. Их применяют в качестве датчиков непрерывного действия для преобразования в напряжение механических линейных или угловых перемещений.

Структурная схема потенциометрического датчика состоит из одного преобразователя, где входной величиной $x_{вх}$ является механическое перемещение, а выходная величина $x_{вх}$ представляет собой напряжение постоянного или переменного тока.

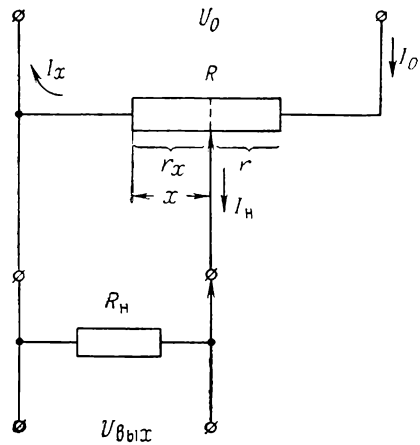


Рис. 9. Потенциометрический датчик

Конструктивно потенциометрический датчик выполнен в виде проволочного трехконтактного реостата с непрерывной обмоткой из провода с большим удельным электрическим сопротивлением. Вдоль обмотки по обнаженной от изоляции поверхности провода перемещается электроконтактный движок. Обмотка потенциометра наматывается на плоский или цилиндрический каркас из изоляционного материала или металла: для нее применяют провода из нихрома, манганина, константана и других сплавов с диаметром провода от 0,03 до 0,6 мм. Схема простейшего потенциометрического датчика показана на рис. 9.

Установим передаточную функцию такого датчика. По правилам Кирхгофа

$$U_0 = I_0(R - r_x) + I_н R_н; \tag{37}$$

$$I_x r_x = I_н R_н; \tag{38}$$

$$I_0 = I_н + I_x = I_н + I_н \frac{R_н}{r_x} = I_н \left(1 + \frac{R_н}{r_x}\right). \tag{39}$$

Выходное напряжение датчика в относительных единицах выразится соотношением

$$U^*_{вых} = \frac{U_{вых}}{U_0} = \frac{I_н R_н}{I_0(R - r_x) + I_н R_н} = \frac{1}{\frac{I_0}{I_н}\frac{R - r_x}{R_н} + 1}. \tag{40}$$

Подставив в (40) значения из (39), получим

$$U^*_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_0} = \frac{1}{\frac{1}{x^*} + \frac{R}{R_{\text{н}}}(1 - x^*)}, \qquad (41)$$

где R — полное сопротивление потенциометра; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки; U_0 — напряжение питания датчика; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе датчика; $x^* = \frac{r}{R}$ — относительное перемещение движка потенциометра.

Из формулы (40) следует, что из-за параллельного подключения сопротивления нагрузки выходное напряжение датчика

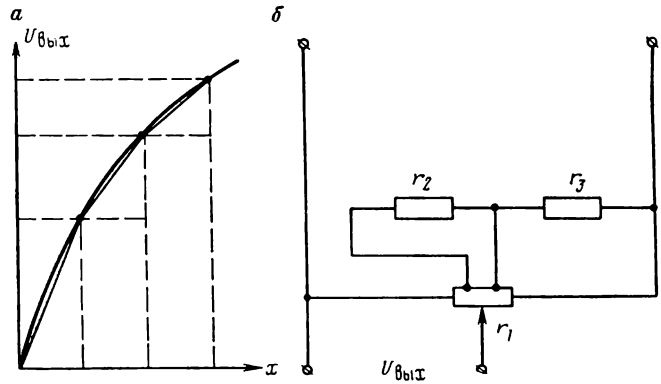


Рис. 10. Потенциометрический датчик с шунтами

является нелинейной функцией x^* и $R/R_{\text{н}}$. При $R_{\text{н}} \to \infty$ и $R/R_{\text{н}} = 0$ эта зависимость обращается в линейную

$$U_{\text{вых}} = x^* U_0. \qquad (42)$$

Поскольку величину $R_{\text{н}}$ нельзя сделать бесконечно большой, что вызвало бы в свою очередь значительное уменьшение выходной мощности датчика, то для практических целей обычно принимают отношение $R/R_{\text{н}} = 0{,}1 \div 1$, которое не может обеспечить линейной характеристики датчика. Поэтому в необходимых случаях спрямление статической характеристики датчика можно получить за счет усложнения схемы потенциометра — составить сложный датчик из отдельных потенциометров. На рис. 10, *б* приведена схема такого датчика, его статическая характеристика, представляющая собой ломаную линию, каждый из участков которой близок к прямой, показана на рис. 10, *а*.

Используя определенные методы расчета и современную технологию, можно создать функциональные потенциометрические датчики. Особенность таких датчиков заключается в возможности реализации заранее заданной функции преобразования линейного

или углового перемещения в напряжение, что достигается за счет особой конструкции каркаса потенциометра и его намотки.

Чувствительность простого потенциометра определяется как

$$k = \frac{dU^*_{\text{вых}}}{dx^*} = \frac{\dfrac{R}{R_\text{н}} + \dfrac{1}{x^{*2}}}{\left[\dfrac{1}{x^*} + \dfrac{R}{R_\text{н}}(1-x^*)\right]^2}, \tag{43}$$

а мощность выходного сигнала

$$P_{\text{вых}} = \frac{U^2_{\text{вых}}}{R_\text{н}} = \frac{U_0^2}{R_\text{н}\left[\dfrac{1}{x^*} + \dfrac{R}{R_\text{н}}(1-x^*)\right]^2}. \tag{44}$$

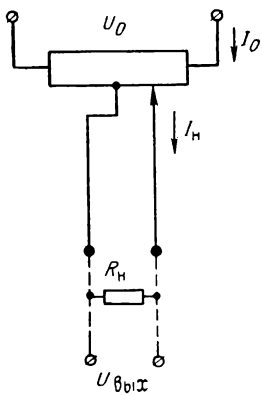


Рис. 11. Реверсивный потенциометрический датчик

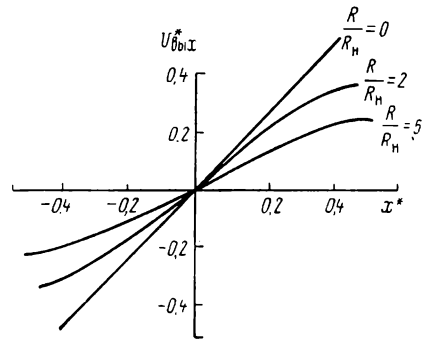


Рис. 12. Статическая характеристика реверсивного датчика

Рассмотренный датчик является однополярным, т. е. датчиком, знак выходного сигнала которого не изменяется при перемещении движка в пределах $x^* = 0 \div 1$.

Для решения большого количества практических задач необходимо иметь датчики, у которых знак (или фаза) выходного сигнала изменяется с изменением знака сигнала на входе, т. е. иметь так называемый реверсивный датчик.

В реверсивном датчике (рис. 11) выходное напряжение снимается по отношению к средней точке потенциометра; статическая характеристика такого датчика приведена на рис. 12.

Если реверсивный датчик запитан постоянным напряжением, то при прохождении движка через среднюю точку потенциометра выходное напряжение изменяет знак.

При питании датчика переменным током в момент прохождения движком потенциометра средней точки происходит изменение фазы выходного напряжения на 180°.

К достоинствам потенциометрических датчиков следует отнести простоту конструкции, малые габариты, возможность питания от сети постоянного или переменного тока.

Недостатки — наличие скользящего контакта и возможность его нарушения, относительно невысокий коэффициент усиления, нелинейность статической характеристики (при подключенной нагрузке).

Потенциометрические датчики находят применение в автоматизации геодезических измерений при изучении смещений и осадок сооружений, в качестве преобразующих элементов в оконечных каскадах автоматических устройств, в полуавтоматических устройствах для дистанционного управления измерительными звеньями и механизмами.

§ 9. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Для преобразования линейных и угловых механических перемещений в электрический сигнал могут применяться индуктивные датчики. Принцип действия таких датчиков заключается в изменении индуктивности и индуктивного сопротивления элементов его схемы при изменении их взаимного положения.

Индуктивный датчик содержит одну или несколько катушек индуктивности, располагаемых на магнитопроводящем каркасе, и подвижный якорь (вместо якоря может быть использована также струна из ферромагнитного материала).

Индуктивные датчики с натянутой струной могут быть применены в высокоточных геодезических приборах для вертикального проектирования точек, для створных наблюдений, центрирования.

Как известно, индуктивное сопротивление определяется индуктивностью катушки индуктивности и частотой питающего напряжения

$$x_L = \omega L = 2\pi f L, \tag{45}$$

где L — индуктивность катушки, f — частота питающего напряжения.

Для датчика, изображенного на рис. 13, его индуктивность выражается формулой [23]

$$L = \frac{0{,}4\pi W^2 \cdot 10^{-8}}{R_{ст} + \dfrac{2x}{S}}, \tag{46}$$

где W — число витков обмотки; x — длина воздушного зазора, см; S — площадь поперечного сечения воздушного зазора между якорем и магнитопроводом, см^2; $R_{ст}$ — магнитное сопротивление сердечника и якоря.

Параметры такого датчика связаны между собою уравнением

$$I_н = \frac{U_0}{\sqrt{(R_н + r_к)^2 + (2\pi f L)^2}}, \tag{47}$$

где $I_н$ — действующее значение тока датчика, А; $r_к$ — активное сопротивление катушки датчика, Ом; $R_н$ — сопротивление нагрузки, Ом; U_0 — напряжение питания переменного тока частотой f, В; L — индуктивность датчика, Г.

Величина тока $I_н$ такого датчика при неизменном напряжении питания U_0 определяется величиной воздушного зазора между якорем и сердечником, однако независимо от положения якоря фаза напряжения, выделяемого на нагрузке, остается неизменной и соответствует фазе питающего напряжения; такой датчик является однофазным.

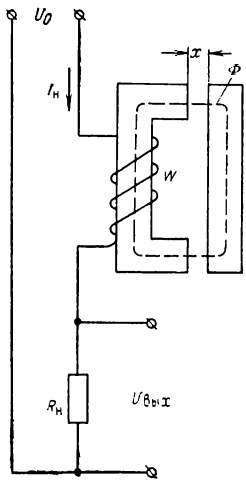


Рис. 13. Простой индуктивный датчик

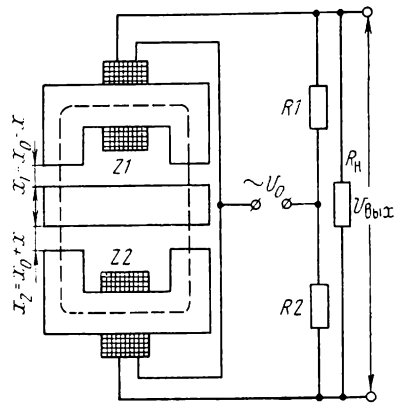


Рис. 14. Двухфазный индуктивный датчик

Для практического применения более удобными являются двухфазные индуктивные датчики (рис. 14), у которых величина выходного сигнала определяет величину смещения его подвижных элементов относительно каркаса магнитопровода, а фаза сигнала — направление смещения. Такие датчики содержат две катушки индуктивности, включенные по дифференциальной (разностной) схеме.

При среднем положении якоря индуктивное сопротивление обоих плеч датчика одинаково и разность токов, протекающих через катушки индуктивности, равна нулю, т. е. выходной сигнал отсутствует.

Если через $Z1$, $Z2$ обозначить комплексные сопротивления катушек индуктивности, $R1$, $R2$, $R_н$ — добавочные сопротивления схемы и сопротивление нагрузки, то статическая характеристика дифференциального датчика может быть выражена уравнением (при $R_н \to \infty$)

$$\dot{U}_{вых} = \frac{\dot{U}_0 (Z1 - Z2)}{(Z1 + R1)(Z2 + R2)} . \qquad (48)$$

На практике широко применяется и так называемая трансформаторная мостовая схема включения индуктивного датчика (рис. 15). В мостовой схеме нагрузка $R_н$ включается в одну из диагоналей электрического моста на разность напряжений двух ветвей датчика.

В этом случае статическая характеристика (для $R_н = \infty$) имеет вид

$$\dot{U}_{вых} = \frac{\dot{U}_0 (Z1 - Z2)}{Z1 + Z2}. \qquad (49)$$

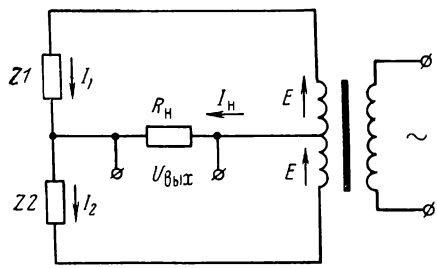


Рис. 15. Мостовая трансформаторная схема включения индуктивного датчика

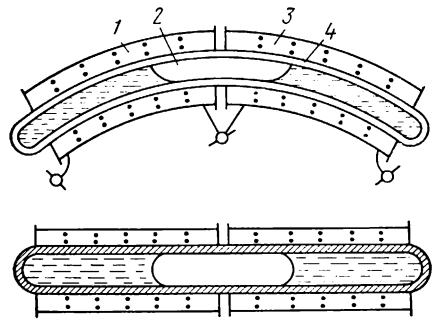


Рис. 16. Жидкостный дифференциальный индуктивный датчик

Пренебрегая активным сопротивлением катушек и учитывая, что

$$Z_1 = \omega L_0 \left(1 + \frac{x}{x_{max}}\right); \quad Z_2 = \omega L_0 \left(1 - \frac{x}{x_{max}}\right),$$

где L_0 — индуктивность датчика при среднем положении якоря; x_{max} — максимальное отклонение якоря, при $R_н \to \infty$ из формулы (49) следует

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_0 \frac{x}{x_{max}}. \qquad (50)$$

Из последнего выражения видно, что выходное напряжение при смещении якоря индуктивного датчика изменяется линейно.

Интересным в конструктивном отношении является жидкостный дифференциальный индуктивный датчик для измерения углов наклона [88], в котором сердечник выполнен в виде ампулы цилиндрического уровня, заполненной жидкостью с высокой магнитной проницаемостью, что позволяет повысить чувствительность и быстродействие датчика. Схема такого датчика представлена на рис. 16.

Датчик содержит подвижный сердечник в виде ампулы цилиндрического уровня *4*, содержащей воздушный пузырек *2*.

Соленоидные катушки *3* и *1* надеты на стеклянную ампулу, включены в электрическую схему по принципу мостовой схемы

и питаются переменным током от генератора. При наклоне ампулы уровня за счет перемещения воздушного пузырька датчика происходит изменение индуктивности катушек *3* и *1*, которое фиксируется регистрирующим устройством. При наклоне ампулы цилиндрического уровня на 2° пузырек воздуха смещается на 2 ÷ 3 мм, что позволяет регистрировать угол наклона с точностью 0,5″.

Индуктивные датчики имеют прочную конструкцию, высокую надежность и высокий коэффициент усиления, достигающий нескольких сотен вольт на 1 мм.

Точность измерения линейных и угловых смещений индуктивными датчиками очень высокая — до нескольких мкм в диапазоне около 1 мм и до сотых долей угловых секунд в диапазоне до десятков секунд.

К недостаткам индуктивных датчиков следует отнести трудность регулировки для получения нулевых значений напряжения на выходе дифференциального датчика, возможность работы только на переменном токе.

§ 10. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Для преобразования перемещения в изменение выходного напряжения могут быть использованы и конденсаторы переменной емкости — емкостные датчики.

Принцип их действия основан на учете изменения электрических параметров схемы датчика при изменении емкости конденсатора переменной емкости за счет механического перемещения пластин конденсатора или изменения диэлектрической проницаемости среды конденсатора.

Изменение емкости можно получить изменением расстояния между электродами или чаще — изменением площади взаимного перекрытия электродов, а также изменяя диэлектрическую проницаемость среды между пластинами конденсатора.

Емкость таких датчиков составляет обычно всего лишь тысячные доли микрофарады. Это требует для повышения выходной мощности специального высокочастотного питания.

В общем случае емкость конденсатора есть произведение диэлектрической проницаемости ε на геометрическую проводимость G зазора между электродами

$$C = \varepsilon G, \tag{51}$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$; $\varepsilon_0 = 8{,}85$ мкм мкФ/м²; для воздушного диэлектрика $\varepsilon_r = 1$.

Для плоского конденсатора приближенно можно принять $G = S/\delta$, где S — площадь электрода; δ — зазор между электродами. Подставив значение G в (51), получим общее выражение для емкости конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}. \tag{52}$$

При изменении зазора δ емкость изменяется по гиперболическому закону. Для получения линейной зависимости необходимо, чтобы рабочий ход был не более 0,1 от начального зазора δ_0 [2]. Чувствительность емкостного датчика выражается как

$$\frac{\partial C}{\partial \delta} = \frac{\varepsilon S}{\delta^2}.$$

Для спрямления характеристики датчика используют дифференциальные датчики. Линейное изменение емкости в больших пределах дает также перемещение диэлектрика между обкладками.

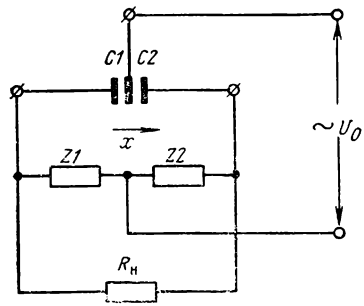


Рис. 17. Схема включения емкостного датчика

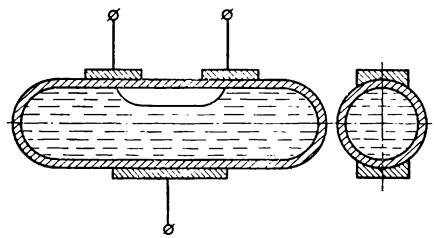


Рис. 18. Схема дифференциального емкостного датчика

Точность емкостных датчиков зависит от влияния температуры на геометрические размеры и диэлектрическую проницаемость (в датчиках с жидким и с твердым диэлектриком). Применение дифференциальных схем сводит эти погрешности к минимуму.

Питание измерительных схем дифференциальных емкостных датчиков осуществляется обычно переменным током повышенной частоты — от нескольких килогерц до десятков мегагерц.

Электрическая схема включения дифференциального емкостного датчика показана на рис. 17.

Дифференциальный конденсатор обычно выполняют в виде жидкостной ампулы уровня, помещенной между трех обкладок-электродов (рис. 18). При наклоне ампулы уровня за счет смещения воздушного пузырька происходит изменение диэлектрической проницаемости среды такого конденсатора в каждом из его плеч. Это вызывает, в свою очередь, изменение реактивного сопротивления плеч мостовой электрической схемы и, как следствие, ее разбаланс.

Величина этого разбаланса регистрируется измерительным прибором, входящим в комплект датчика.

Электронные трехэлектродные емкостные датчики позволяют автоматически наблюдать за наклонами объекта в диапазоне до 200″со средней квадратической ошибкой определения величины наклона $\pm 0{,}2''$ и меньше.

Флуктуация показаний электронного уровня не превышает $\pm 0{,}06''$, если приняты меры для уменьшения влияния внешних условий. Исследования таких датчиков показывают [107], что статическая характеристика дифференциальных датчиков линейна в широком диапазоне и нелинейность проявляется на краях (до 8%). Гистерезис статической характеристики на рабочем участке составляет около 0,1%. С точки зрения динамических характеристик такой датчик является колебательным динамическим звеном, переходная характеристика которого является апериодической кривой затухающих колебаний.

Логарифмический декремент затухания $v = \ln a_1/a_2$, где a_1, a_2 — амплитуды в начале и конце колебания, примерно равен 2, а время успокоения колебаний $\tau = T/v$, где T — условный период, составляет $5 \div 7$ с. Полное время успокоения пузырька уровня, заполненного смесью спирта и эфира и выведенного из равновесия, примерно постоянно и равно около 30 с.

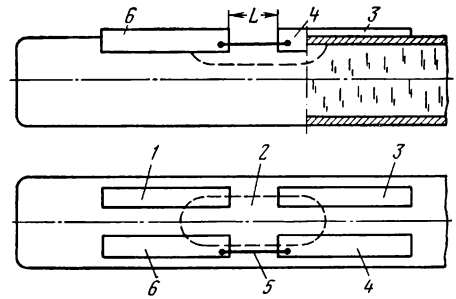


Рис. 19. Четырехэлектродный электронный уровень

Известны [106] конструкции емкостных датчиков, в которых с целью повышения чувствительности и стабильности их показаний электроды конденсатора выполнены в виде четырех электропроводящих пластин, размещенных над газовым пузырьком ампулы симметрично относительно его концов (рис. 19).

Над газовым пузырьком *2* размещены четыре металлические пластины-электроды *1*, *3*, *4* и *6* таким образом, чтобы расстояние L между концами электродов соответствовало положению концов газового пузырька.

При дифференциальной схеме включения такого датчика противофазные высокочастотные напряжения от генератора подводят к пластинам *1* и *3*, а электроды *4* и *6* соединяют проводником *5* и с него снимают напряжения рассогласования.

Чувствительность такого уровня очень высока и составляет $0{,}05''$ на одно деление шкалы регистрирующего прибора.

Для повышения точности отсчета в емкостных датчиках могут быть применены специальные маятниковые устройства [8]. В таких уровнях подвижные обкладки конденсаторов укреплены на концах маятников, а неподвижные электроды конденсатора расположены на его основании и смещены в противоположные стороны относительно осей подвеса маятников.

Такое устройство (рис. 20) содержит два емкостных датчика с подвешенными на упругих пластинах маятниками *1*. К нижним

концам маятников прикреплены подвижные обкладки *2* конденсаторов.

Неподвижные обкладки *3* конденсаторов смещены в противоположные сторны относительно осей подвеса маятников и электрически соединены с колебательными контурами излучающих генераторов *4*.

Для измерения углов наклона дистанционно каждый генератор содержит небольшую излучающую антенну *5* и питается от малогабаритного автономного источника питания.

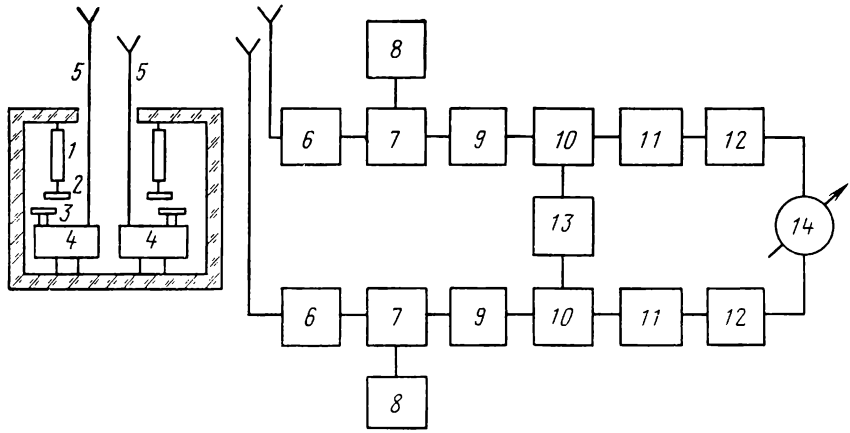


Рис. 20. Маятниковый емкостный датчик

Индикаторное устройство выполнено в виде двухканального радиоприемника, посредством которого осуществляется телеметрическая связь с индикаторным устройством.

Маятники емкостного датчика для демпфирования их колебаний при наклоне основания помещены в сосуды с маслом. Плоскоть колебаний маятников в таком датчике совмещена с плоскостью измеряемого угла. Поэтому при наклоне основания датчика подвижные обкладки конденсатора смещаются относительно неподвижных таким образом, чтобы емкость одного из конденсаторов увеличивалась, а другого уменьшалась. Изменение емкостей двух конденсаторов приводит к соответственному изменению (уменьшению и увеличению) частот, излучаемых генераторами датчика.

Каждая из частот датчика принимается соответствующей антенной приемного устройства, в котором электромагнитные колебания преобразуются в электрический сигнал, усиливаются и поступают в ячейку скорости счета. Разностное напряжение на выходе этих ячеек, измеряемое стрелочным прибором, соответствует величине угла наклона датчика.

Каждый канал радиоприемного устройства содержит (рис. 20) усилитель высокой частоты *6*, смеситель *7*, первый гетеродин *8*,

усилитель промежуточной частоты *9*, второй смеситель *10*, преобразователь *11* формы сигнала, ячейку *12* скорости счета [8]. Второй гетеродин *13* и стрелочный прибор *14* являются общими для обоих каналов радиоприемного устройства.

Цена деления такого емкостного датчика составляет 0,05″ на 2 мм шкалы стрелочного прибора, а точность отсчитывания составляет величину около 0,005″.

Емкостные датчики в инженерной геодезии могут найти применение для высокоточных измерений линейных и угловых смещений элементов конструкций и технологического оборудования.

§ 11. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Фотоэлектрические датчики нашли самое широкое применение в различных областях измерительной техники, а в последние годы и в практике инженерно-геодезических измерений. Такому широкому использованию фотоэлектрические датчики обязаны высокой точности измерения линейных и угловых смещений, возможности полной автоматизации как самого процесса измерения, так и обработки результатов.

В настоящее время создано значительное число датчиков для измерения линейных и угловых смещений, отличающихся по назначению, принципу действия, точности, структуре составляющих датчик звеньев и т. д. Однако независимо от указанных отличий все фотоэлектрические датчики должны отвечать определенным принципам построения.

Фотоэлетрический датчик, как правило, содержит чувствительный элемент, усилительное звено, устройство преобразования информации, регистратор (рис. 21).

Чувствительный элемент содержит координатор и приемник лучистой энергии (ПЛЭ), назначение которых состоит в первичном преобразовании информации о линейных или угловых смещениях в электрический сигнал.

Измерение линейных или угловых смещений фотоэлектрическим датчиком в большинстве случаев осуществляется относительно оптической оси светового луча, при помощи которого задают проектное положение геодезической опорной линии. В качестве источников излучения, используемых для формирования опорной линии, могут применяться совместно с формирующей оптикой лазеры, тепловые излучатели, светодиоды. Принципы формирования опорной геодезической линии рассмотрены в § 16. Однако известны также датчики, в которых и осветитель и чувствительный элемент конструктивно объединены.

Координаторы фотоэлектрических датчиков осуществляют первичное распознавание пространственного положения излучателя относительно базовой точки (оптической оси) датчика. Они могут быть выполнены в виде двух- или четырехгранной светоделительной призмы, в виде сканирующей щели, мозаичной структуры из фотоприемников и т. д.

Приемник лучистой энергии осуществляет связь между оптической и электрической частями фотоэлектрического датчика. К ПЛЭ предъявляются определенные требования к его спектральной чувствительности, интегральной чувствительности и световой характеристике, напряжению шумов, пороговой мощности, частотной характеристике. Далеко не последнюю роль играют и габаритные размеры ПЛЭ.

Одной из важнейших характеристик фотоприемника является его реакция к потоку излучения при различных условиях включения и работы.

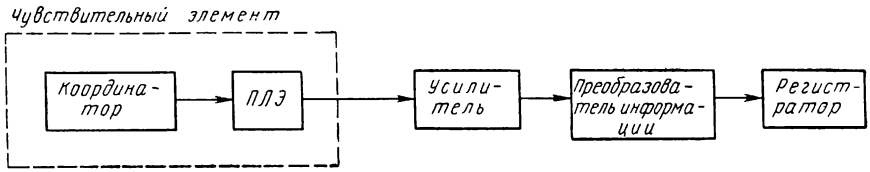


Рис. 21. Схема фотоэлектрического датчика

Реакцией ПЛЭ на воздействие излучения с различной длиной волны является спектральная характеристика, определяемая в основном оптическими и квантово-механическими свойствами материала, из которого изготовлена чувствительная площадка фотоприемника.

Например, спектральная характеристика полупроводниковых фотоприемников в сильной степени зависит не только от технологических особенностей ПЛЭ (глубины залегания p — n-перехода, качества обработки поверхности), но и от условий его включения в схему (вентильный или фотодиодный режим, величина напряжения питания, величина сопротивления нагрузки и др.).

При этом длинноволновая граница спектральной характеристики практически не изменяется, а в сильной степени изменяется чувствительность в коротковолновой части спектра и в области максимума чувствительности, что особенно заметно на кремниевых фотодиодах [100].

Величина пороговой мощности $P_{\text{п. фп}}$ фотоприемника определяется его шумами и интегральной или вольтовой чувствительностью

$$P_{\text{п. фп}} \backsim \frac{\sqrt{\overline{U_{\text{ш}}^2}}}{S_u} \quad \text{или} \quad P_{\text{п. фп}} \backsim \frac{\sqrt{\overline{i_{\text{ш}}^2}}}{S_i}.$$

Важнейшими из шумов ПЛЭ являются тепловой, токовый и дробовый шумы, а также фотонный шум, возникающий за счет флуктуаций излучения, падающего на фотоприемник.

Методика расчета параметров ПЛЭ и вопросы его согласования с последующими элементами схемы достаточно подробно

излагаются в работах [124, 90], поэтому кратко остановимся на рассмотрении некоторых типов ПЛЭ, которые могут быть применимы для высокоточных инженерно-геодезических датчиков.

Поскольку в оптико-электронных устройствах геодезического назначения практическими рабочими частотами модуляции лучистого потока часто являются частоты до нескольких кГц, то во многих случаях отпадает необходимость применения ПЛЭ с широким частотным диапазоном (например, ФЭУ), если имеющиеся низкочастотные фотоприемники удовлетворяют требованиям по спектральной чувствительности, напряжению шумов, пороговой мощности, интегральной чувствительности.

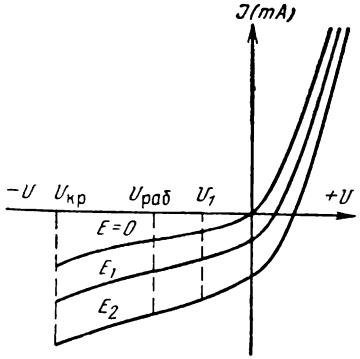


Рис. 22. Вольт-амперные характеристики фотодиодов

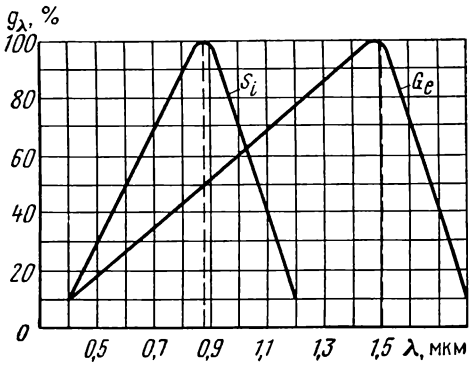


Рис. 23. Относительная спектральная чувствительность полупроводниковых ПЛЭ

В качестве таких фотоприемников можно назвать ряд германиевых и кремниевых фотодиодов, а также инверсионные фотоприемники. Малые габариты, низкие напряжения питания, малый уровень шумов, достаточно высокая интегральная чувствительность, малая зависимость их характеристик от изменения питающего напряжения, а также устойчивость к внешним воздействиям возволяют считать целесообразным их применение в фотоэлектрических датчиках.

Величина рабочего напряжения ($U_{раб}$) фотодиодов выбирается по вольтамперным характеристикам таким образом, чтобы оно было меньше критического ($U_{кр}$), и в то же время находилось на участке насыщения вольтамперной характеристики (рис. 22).

Интегральная или токовая чувствительность фотодиодов (S_i) определяется по их световой характеристике, показывающей зависимость величины фототока от интенсивности возбуждающего потока. Практически S_i определяется при заданной величине освещенности E и рабочем напряжении $U_{раб}$ в режиме короткого замыкания ($R_н = 0$)

$$S_i = \frac{I_{св}\,(\text{мкА}) - I_т\,(\text{мкА})}{E\,(\text{лк})} = \frac{I_ф}{E}\left(\frac{\text{мкА}}{\text{лк}}\right). \qquad (53)$$

Фототок $I_ф$ есть разность между световым $I_{св}$ и темновым $I_т$ токами при известном напряжении питания на фотодиоде.

На рис. 23 приводятся усредненные характеристики относительной спектральной чувствительности германиевых и кремниевых ПЛЭ. Области сохранения линейности световой характеристики для фотодиодов разных типов различны.

Так, германиевые фотодиоды в фотодиодном режиме насыщаются при интенсивностях порядка от тысячи до десятков тысяч люксов, кремниевые фотодиоды сохраняют в фотодиодном

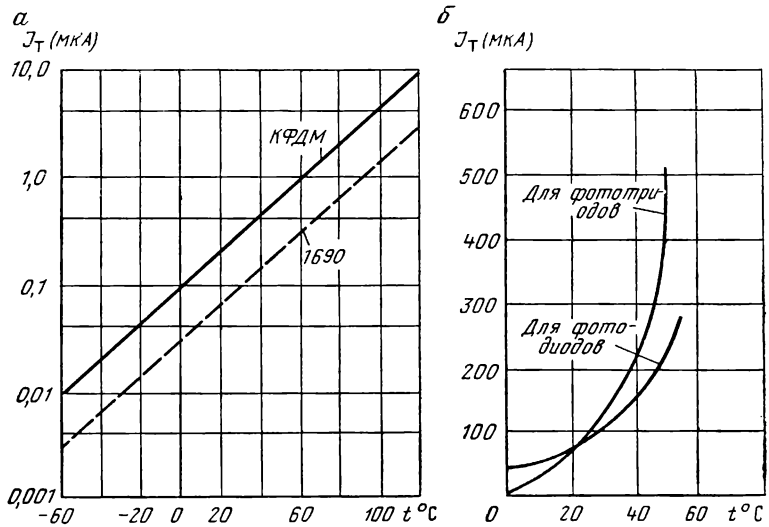


Рис. 24. Зависимость темнового тока от температуры

режиме чувствительность до величин, превышающих сотни тысяч люксов.

Насыщение световой характеристики фотодиодов при вентильном режиме наступает на уровнях освещенности меньших, чем в фотодиодных режимах.

При работе фотодиодов изменение температуры влияет в основном на темновой ток; фототок также изменяется, но в значительно меньшей степени. Приведем типичные зависимости темнового тока от температуры окружающей среды для кремниевых фотодиодов КФДМ и 1690 (рис. 24, *а*) и германиевого фотодиода ФД-3 (рис. 24, *б*). Шумы фотодиодов и фототриодов представляют собой флуктуации тока, протекающего через ПЛЭ при отсутствии засветки или же при воздействии немодулированного лучистого потока. Напряжение шумов выделяется на сопротивлении нагрузки, включенном последовательно с фотоприемником. Вследствие этого величина напряжения шума фотоприемника, во многом определяющая требования к последующим

элементам схемы оптико-электронного прибора, должна рассматриваться как величина, характерная для строго определенного режима включения ПЛЭ, при котором известны напряжения на фотоприемнике, величина сопротивления нагрузки и величина возбуждающей засветки. Так же, как и темновой ток, шумы в сильной степени зависят от температуры окружающей среды.

На рис. 25 показаны основные режимы включения фотодиодов — фотодиодный (рис. 25, *а*) и вентильный (рис. 25, *б*).

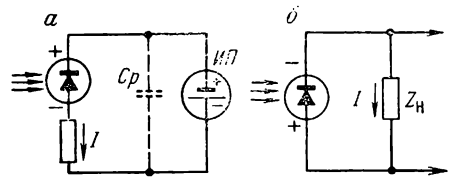


Рис. 25. Схема режимов включения фотодиодов

В ряде случаев при создании высокоточных фотоэлектрических датчиков находят применение приемники с внешним фотоэффектом. Из таких приемников широкое применение получили фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Принципиальная схема ФЭУ и способ его включения показаны на рис. 26. Фотоэлектронный умножитель содержит катод K, анод A и динодную систему, состоящую из нескольких электродов S_1, S_2, . . ., S_n. Каждый из указанных электродов запитан от делителя напряжения постоянного тока, создающего последующее нарастание напряжения от катода к аноду. Принцип действия ФЭУ состоит в преобразовании световой энергии в фотоэлектрическую эмиссию с последующим многократным ее усилением.

Первичные электроны, выделяемые фотокатодом K под воздействием квантов падающего светового потока, под действием ускоряющего электростатического поля вызывают вторичную электронную эмиссию в динодной системе. Вторичные электроны с электрода S_1 в свою очередь за счет действия ускоряющего поля поступают на электрод S_2, вызывая появление новых электронов, и так далее. Фототок в ФЭУ нарастает лавинообразно и его величина на выходе определяется соотношением

$$i_ф = i_0 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^n, \qquad (54)$$

где i_0 — первичный фототок с поверхности фотокатода; $\frac{N_2}{N_1} = \sigma_{эм}$ — коэффициент вторичной эмиссии; n — число электродов.

В отличие от полупроводниковых приемников излучения ФЭУ имеют высокую интегральную чувствительность (до 250 $\frac{мкА}{лм}$) и весьма малую инерционность (постоянная времени некоторых ФЭУ $\leqslant 10^{-9}$ с). При решении вопроса о выборе для датчика того или иного типа фотоэлектронного умножителя следует учитывать соответствие спектральных характеристик излучателя и ФЭУ.

1. *Фотоэлектрические датчики для измерения линейных смещений.* Фотоэлектрические датчики линейных смещений характе-

ризуются рядом параметров, среди которых в первую очередь выделяют крутизну и степень линейности позиционной характеристики, величину минимально обнаруживаемого линейного смещения, быстродействие, порог чувствительности, величину зоны чувствительности.

Основным уравнением датчика линейных смещений является [50]

$$A(\delta) = B[\Phi(\delta)], \tag{55}$$

где $A(\delta)$ — выходной сигнал датчика; $B(\Phi)$ — оператор, описывающий способ выделения сигнала рассогласования; $\Phi(\delta)$ — поток излучения на регистрирующем элементе.

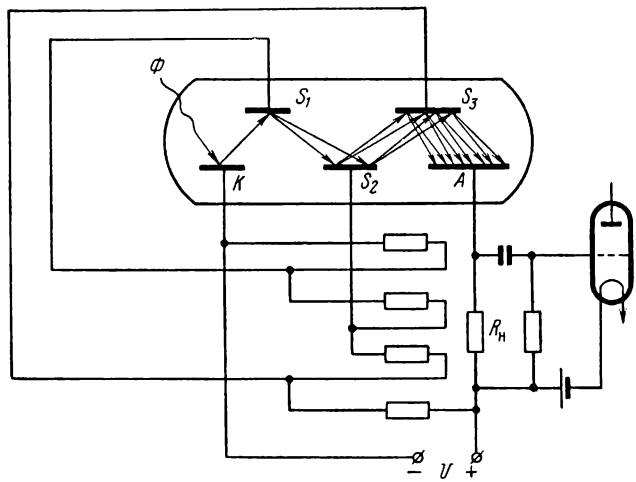


Рис. 26. Схема включения фотоэлектронного умножителя

Крутизна S позиционной характеристики определяется выражением

$$S = \frac{dA(\delta)}{d\delta}.$$

Линейность позиционной характеристики определяет точностные свойства датчика и в первую очередь зависит от характера распределения энергии излучателя по координатору датчика. Минимально обнаруживаемое смещение δ_{min} определяется из условия

$$A(\delta_{min}) = \rho_0 \sqrt{\overline{U}^2_{ш}}, \tag{56}$$

где ρ_0 — отношение сигнал/шум, при котором может работать датчик; $\overline{U}^2_{ш}$ — среднеквадратическое значение шумов датчика.

Быстродействие датчика определяется его динамическими свойствами и характеризуется временем, исчисляемым от момента

прихода сигнала на вход датчика до момента, когда сигнал на выходе достигнет некоторого заранее установленного значения от выходной величины при длительном воздействии. Быстродействие (постоянная времени) датчика определяется типом используемого приемника и конструкцией датчика.

Порог чувствительности датчика определяется чувствительностью используемого приемника излучения. Зона нечувствительности датчика определяет диапазон начальных смещений, при котором на выходе датчика не наблюдается изменения выходного сигнала. Величина зоны нечувствительности определяется конструкцией координатора и свойствами фотоприемника.

Для высокоточного определения величины линейного смещения базовой точки датчика относительно опорной линии, заданной оптическим излучением, при выполнении инженерно-геодезических измерений с успехом могут применяться амплитудные и время-импульсные способы выделения информации.

В фотоэлектрических датчиках амплитудного типа величина смещения объекта (базовой точки датчика) относительно оптической оси светового луча определяется по амплитуде сигнала в цепи приемника лучистой энергии. Выходной сигнал у датчиков этого типа зависит от величины интенсивности светового потока. Это обстоятельство часто оказывает отрицательное влияние на точность выполняемых измерений и требует применения специальных мер, снижающих зависимость результатов измерения от величины потока излучения. Позиционная характеристика датчиков с амплитудным координатором в общем виде может быть представлена уравнением [44]

$$U_{\text{вых}} = NS_u \varphi(\Phi) f(\delta), \tag{57}$$

где $U_{\text{вых}}$ — сигнал на выходе датчика; N — коэффициент использования светового потока; δ — линейное смещение; S_u — вольтовая чувствительность; $\varphi(\Phi)$ — функция, определяющая зависимость выходного сигнала от величины принимаемого светового потока Φ; $f(\delta)$ — функция, определяющая зависимость выходного сигнала от величины линейного смещения δ.

На практике стремятся к осуществлению линейной зависимости между выходным сигналом $U_{\text{вых}}$ датчика и величиной линейного смещения δ. Это условие накладывает определенные требования на распределение световой энергии по диаметру луча, задающего опорную линию, которое по возможности необходимо стремиться сделать равномерным.

Измерение линейных смещений амплитудными фотоэлектрическими датчиками в зависимости от конструкции датчика можно выполнять в одной или одновременно в двух координатных плоскостях.

Наиболее распространенным и простым в конструктивном отношении следует считать однокоординатный датчик с прямоугольной светоделительной призмой (рис. 27, *а*).

Такой датчик содержит светоделительную призму, два фотоприемника, располагаемые относительно ребра призмы таким образом, чтобы при появлении на входе устройства линейного смещения происходило перераспределение световых потоков в каждом из плеч датчика, и разностный электрический сигнал с дифференциальной электрической схемы датчика соответствовал величине линейного смещения.

С целью повышения помехозащищенности оптико-электронной части датчика и обеспечения достаточно простыми средствами

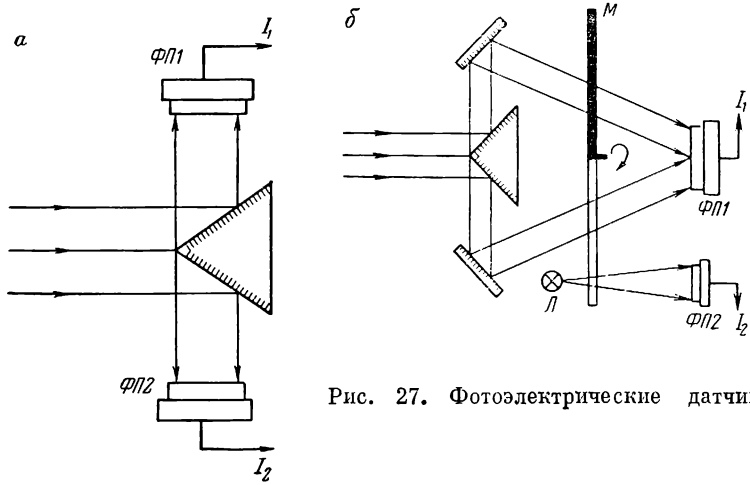


Рис. 27. Фотоэлектрические датчики

необходимого усиления электрического сигнала в схему такого датчика часто вводят модулирующие устройства. Модулятор осуществляет поочередное (со сдвигом на 180°) прерывание световых потоков в каждом плече датчика, и разностный сигнал $I_1 - I_2$ в виде переменного тока сравнивается на фазе с сигналом опорного канала, создаваемого дополнительным источником подсветки $Л$ и фотоприемником $ФП_3$. В зависимости от фазовых соотношений между указанными сигналами определяют направление смещения.

Разновидностью является схема с одним информативным фотоприемником (рис. 27, *б*), позволяющая в ряде случаев уменьшить собственные шумы оптико-электронного тракта и тем самым повысить чувствительность датчика. Для получения высокой чувствительности к точности изготовления модулятора и юстировке оптико-механической части схемы датчика предъявляются повышенные требования, в противном случае нарушается фазировка сигналов, в зоне нулевых смещений в электрической части схемы появляются гармоники паразитного сигнала.

Можно повысить точность измерения линейных смещений, если применить схему датчика, показанную на рис. 28. Модуляция потока излучения в ней осуществляется на передающем устрой-

стве, а электрическая схема датчика линейных смещений содержит устройство выделения сигналов (УВС) в виде суммы и разности токов от фотоприемников. Сравнение в амплитудно-фазовом детекторе (АФД) разностного и суммарного сигналов, фазы которых совпадают или противоположны в зависимости от направления смещения луча с делительного ребра призмы, дает возможность выделить информацию о величине смещения объекта и направление смещения.

Для реализации двухкоординатных датчиков такого типа существует несколько возможностей, одна из которых конструктивно воплощена в схему устройства, приведенного на рис. 29. Устройство содержит четырехгранную пирамиду и четыре фотоприемника.

При изменении положения светового пятна, например вдоль одной оси x, на величину δ_x, изменение фототока, снимаемого с одного квадранта, можно подсчитать по приближенной формуле [44]

$$I_{\Phi}(\delta_x) = \frac{1}{\pi d^2 \left[\frac{1}{2\pi d^2} + Z\,(d^2 - Z^2)^{1/2} + d^2 \arcsin\frac{r}{d} - h\,(d+Z)\right]}, \qquad (58)$$

где $Z = \delta_x - 1/2h$; h — величина зазора между отдельными фотоприемниками; d — диаметр светового пятна.

При смещении луча с вершины пирамиды одновременно вдоль осей x и y величина сигнала на выходе датчика определится из выражений [44]

$$I_x = (I_1 - I_2) - (I_3 + I_4); \qquad (59)$$

$$I_y = (I_1 - I_4) - (I_2 + I_3), \qquad (60)$$

где I_i — сигнал, снимаемый с i-го квадранта.

Одной из модификаций подобной схемы является двухкоординатный датчик с квадрантным модулятором (рис. 30); он содержит пирамиду *1*, зеркало *2*, вспомогательную призму *3*, фотоприемник *5* и квадрантный оптический модулятор *4*. Оптическая схема датчика совмещает все четыре световых потока на единый фотоприемник. Модуляция в противофазе попарно разнесенных световых пучков и применение соответствующей электрической схемы дают возможность измерять линейные смещения одновременно по двум направлениям.

Для выполнения независимых измерений смещения светового пятна вдоль ортогональных координатных осей можно применить светоделительное оптическое устройство (рис. 31).

Устройство включает в себя полупрозрачный куб *1*, две светоделительные призмы *2* и *3*, расположенные в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Световой луч светоделительным кубом разделяется на два луча (свой луч для каждой

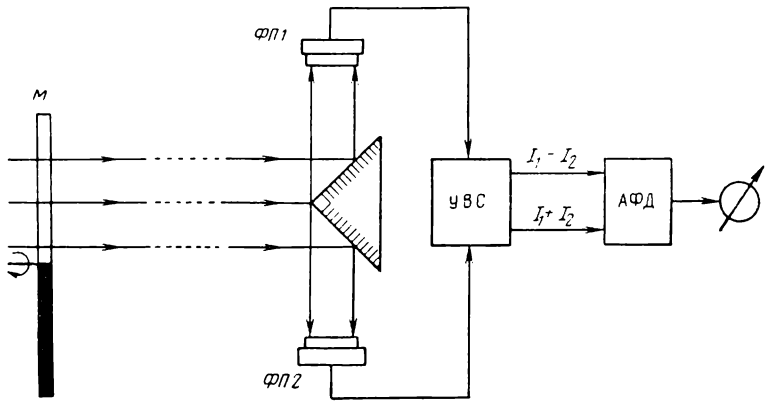


Рис. 28. Датчик с электронным устройством выделения суммы и разности фототоков

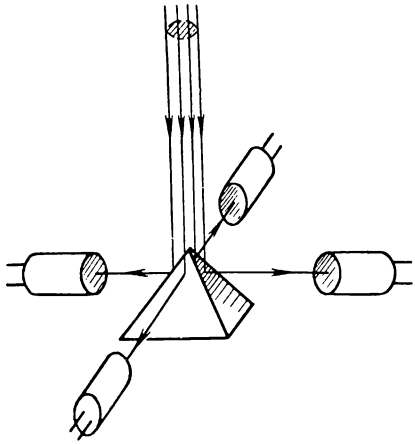


Рис. 29. Фотоэлектрический датчик с четырехгранной пирамидой

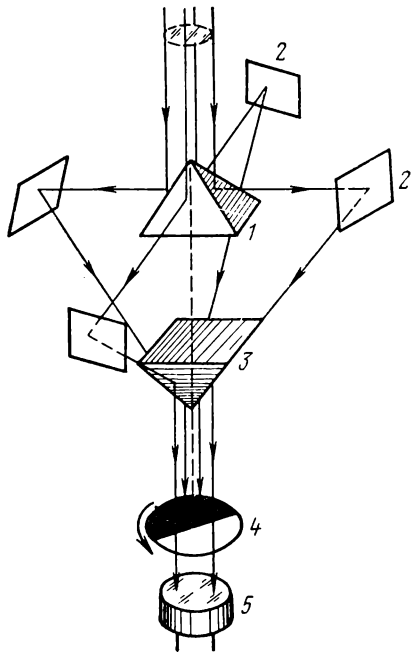


Рис. 30. Двухкоординатный датчик **с** квадрантным модулятором

координаты) и каждый из указанных лучей в свою очередь расщепляется светоделительными призмами на два луча, каждый из которых поступает на светочувствительную площадку фотоприемников.

В ряде случаев для измерения линейных смещений объектов относительно оптического луча могут найти применение так называемые мозаичные датчики линейных смещений (рис. 32). Такие датчики состоят из матрицы *1*, представляющей собой волоконно-оптический преобразователь, фотоприемников *2*, индикаторного электронного устройства *3*.

Распределение волокон в жгуте на входном торце преобразователя и вывод их концов

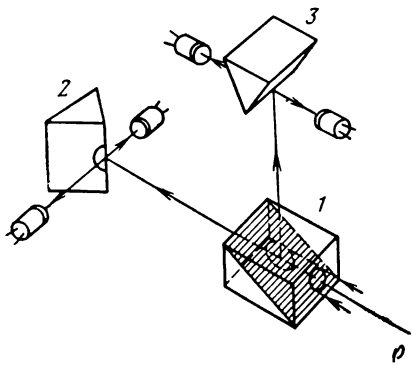


Рис. 31. Оптическая схема разделения светового потока

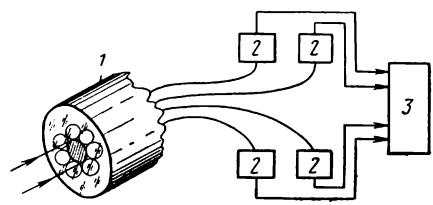


Рис. 32. Мозаичный датчик

к соответствующим фотоприемникам осуществляют в соответствии с заранее заданным законом.

Такой порядок распределения волокон и фотоприемников в совокупности с электронным индикаторным устройством позволяет не только измерять смещение центра светового луча с оси волоконно-оптического преобразователя, но и получать информацию о смещениях объекта в закодированной форме.

Засвечивание соответствующих ячеек волоконно-оптического преобразователя и, следовательно, согласованных с ними фотоприемников происходит в соответствии с характером линейного смещения объекта с оптической оси луча, задающего опорную линию.

В простейшем варианте координатор датчика такого типа может быть выполнен в виде мозаики, составленной из фотоприемников.

Для измерения линейных смещений при выполнении инженерно-геодезических измерений могут применяться время-импульсные датчики линейных смещений.

В датчиках, основанных на время-импульсном методе измерения, информация о перемещениях объекта относительно геометрической оси датчика выражается путем измерения времени между импульсами или сравнения длительности импульсов.

Принцип действия таких датчиков поясняется рис. 33, рис. 34.

Световой луч (см. рис. 33), задающий опорную геодезическую линию, вращается по окружности относительно продольной оси, совпадающей с направлением его распространения. Такой вращающийся луч направляется на крестообразную марку, нанесенную на фокусирующую линзу. В фокальной плоскости на оптической оси линзы установлена светочувствительная площадка фотоприемника.

При совпадении оси вращающегося луча с оптической осью датчика, проходящей через центр крестообразной марки, с фотоприемника

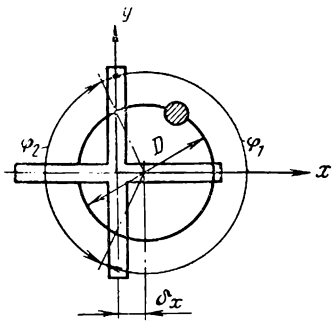


Рис. 33. Схема выделения сигналов

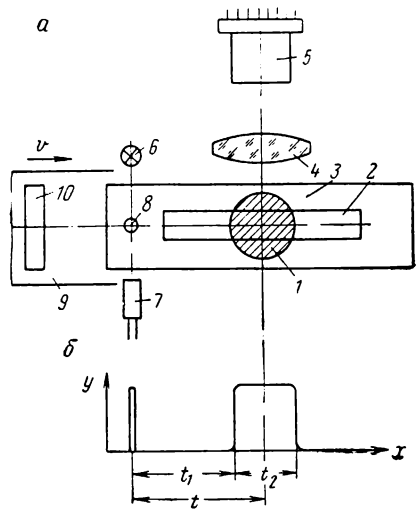


Рис. 34. Время-импульсный датчик со сканирующей щелью

снимают электрические сигналы в виде импульсов равной длительности и скважности. При смещении датчика с оптической оси луча симметричность развертки нарушается и изменяется характер следования импульсов. Так, при смещении геометрической оси датчика вдоль оси x на величину δ_x сигнал рассогласования определяется выражением

$$U_x = k\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2}, \qquad (61)$$

где k — коэффициент, определяющий параметры датчика; t_1, t_2 — длительность временных интервалов между импульсами с фотоприемника.

Электронная часть датчика анализирует длительность временных интервалов между импульсами и на регистратор поступает информация о линейных смещениях по двум взаимно перпендикулярным координатным осям.

Время-импульсный датчик, в котором используют сканирующую щель для измерения линейных смещений, показан на рис. 34, *а*.

Датчик [12] (см. рис. 34, *а*) содержит экран *3* с горизонтальной прямоугольной щелью *2*, за которым равномерно со скоростью

v перемещается непрозрачная шторка *9*, содержащая прямоугольную щель *10*.

Лампочка подсветки *6*, отверстие *8* и фотодиод *7* предназначены для формирования опорного импульса начала отсчета. Конденсор *4* и фотоприемник *5* (ФЭУ) служат для приема излучения *1* от источника света, формирующего в пространстве опорную геодезическую линию.

При равномерном движении щели *10*, например слева направо, вначале формируется импульс от фотодиода *7*, а затем видеоимпульс от ФЭУ. Время t на рис. 34, *б* соответствует интервалу от момента формирования переднего импульса от фотодиода *7* до середины видеосигнала от ФЭУ. Время t_1 — интервал между передними фронтами импульсов от фотодиода и ФЭУ, t_2 — длительность видеоимпульса.

Если через x обозначить координату центра светового пятна на экране, то $t = \frac{1}{v} x$. С учетом длительности t_2 импульса видеосигнала и временного интервала t_1 время t можно представить как

$$t = t_1 + \frac{t_2}{2}. \tag{62}$$

Как видно из последнего уравнения, задача определения координаты $x = vt$ светового пятна на маске датчика сводится к нахождению суммы времен t_1 и $\frac{t_2}{2}$. Точность определения координаты x в таком время-импульсном датчике в первую очередь определяется точностью измерения времени t и постоянством скорости перемещения шторки

$$m_x^2 = v^2 m_t^2 + t^2 m_v^2. \tag{63}$$

Ошибка m_v зависит от стабильности работы электродвигателя, осуществляющего привод сканирующего механизма. Если в процессе измерений контролировать скорость сканирования, что технически вполне осуществимо различными способами, то ошибку за непостоянство скорости развертки практически можно исключить.

Высокой точности измерения времени t можно достичь, применяя число-импульсные пересчетные схемы, управляемые фронтами импульсов время-импульсного датчика [105].

Для измерения линейных смещений можно применять датчики, в которых чувствительный элемент, связанный с измеряемым объектом, непосредственно расположен рядом с осветителем; схема такого датчика приведена на рис. 35 [101].

Датчик содержит светодиоды *9* и *4*, информативный фотоприемник *8*, дополнительный фотоприемник *1*, шторку *6*, связанную с перемещающимся объектом, усилитель *10* сигналов рассогласования мощностей излучения излучателей с элементами

преобразования, цилиндрические линзы *2* и *7*, полупрозрачную пластину *5* и щитки *3*.

Светодиоды *9* и *4* питаются от генератора прямоугольных импульсов и они возбуждаются в противофазе (поочередно). Если шторка *6* располагается в нулевом (среднем) положении, то от каждого светодиода световой поток попадает на полупрозрачную пластинку и большая часть потока излучения проходит через пластину и щель в шторке на плоскость линзы *7*. Линза *7* установлена так, чтобы ее фокус располагался на поверхности светочувствительной площадки фотоприемника *8*, а ось была параллельна кромкам шторки. При этом на поверхности фотоприемника *8* сохраняются от светодиодов две близко расположенные параллельные световые полоски.

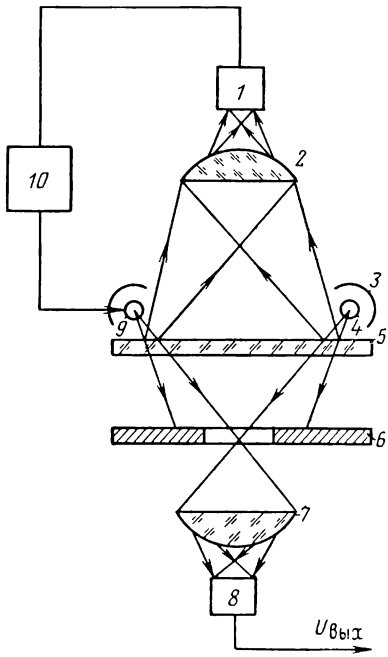


Рис. 35. Фотоэлектрический датчик со светодиодами

Отраженные от пластины *5* световые потоки попадают на плоскую поверхность цилиндрической линзы *2*, а затем на фотоприемник *1*, включенный в контур цепи выравнивания. На светочувствительной площадке фотоприемника *1* также формируются две световые полоски, интенсивность которых пропорциональна световым потокам, падающим на фотоприемник *8*.

Защитные щитки *3* исключают возможность прямого попадания световых потоков от светодиодов на фотоприемник *1*.

При смещении вместе с наблюдаемым объектом шторки *6* в ту или иную сторону нарушается баланс световых потоков в обоих плечах датчика. На фотоприемнике *8* выделяется сигнал, пропорциональный разности перераспределенных шторкой переменных составляющих потоков излучения, а его фаза зависит от направления смещения.

Схема выравнивания обеспечивает высокую стабильность работы датчика. В случае появления разности в падающих на фотоприемник *8* потоках от двух излучателей такая же разность поступает и на фотоприемник *1*. Этот разностный сигнал усиливается усилителем *10* и так воздействует на светодиод *9*, чтобы подавить возникшее первоначальное рассогласование в световых потоках.

Когда шторка *6* располагается в нулевом положении, то даже при изменении чувствительности фотоприемников на выходе

датчика не возникает переменной составляющей сигнала, поскольку контур выравнивания устраняет всякую нестабильность нуля датчика.

Цилиндрические линзы, установленные перед фотоприемниками, не только увеличивают интенсивность световых потоков, падающих на светочувствительные площадки, но и устраняет составляющую дрейфа, вызываемую тепловыми деформациями

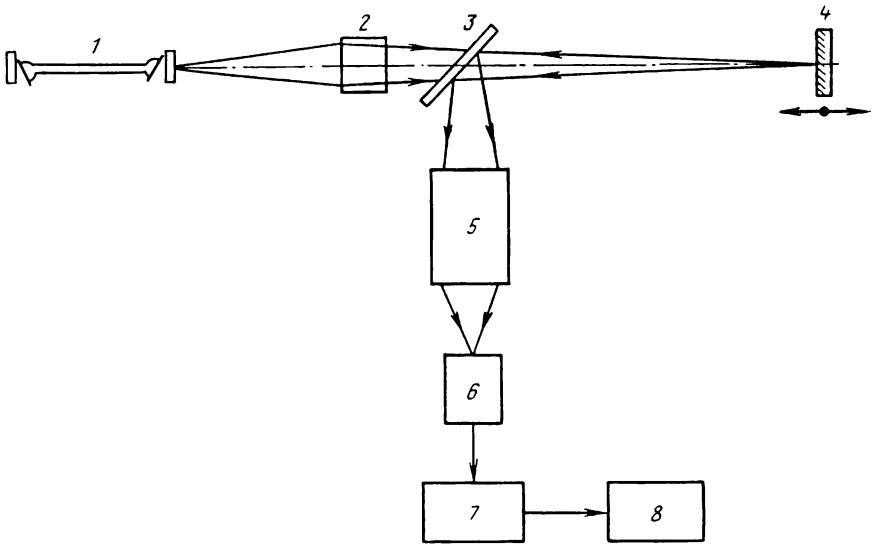


Рис. 36. Датчик линейных смещений с видиконом

элементов датчика. Даже при появлении деформаций телесный угол, мощность излучения в котором участвует в создании полезного сигнала, остается неизменным и определяется контуром плоской поверхности цилиндрической линзы, которая установлена симметрично относительно излучателей.

Для измерения линейного смещения объектов в качестве высокоточных индикаторов находят применение также телевизионные передающие трубки (видиконы) [1], интерферометры [97, 108].

Принципиальная схема датчика линейных смещений с видиконом представлена на рис. 36. Датчик содержит газовый лазер *1*, фокусирующий оптический узел *2*, зеркало *4*, полупрозрачную пластину *3*, цилиндрическую линзу *5*, фотоприемник *6*, блок *7* выработки сигнала рассогласования, блок *8* кодирования и регистрации.

Зеркало *4* является подвижным и закрепляется на перемещаемом объекте. Полупрозрачная пластина *3* располагается под углом 45° к оптической оси цилиндрической линзы *5* и направляет отраженный от зеркала *4* пучок лучей на видикон *6*. Приемная

телевизионная трубка *6* расположена за приемной цилиндрической оптикой *5* таким образом, что ее мишень совпадает с плоскостью изображения сфокусированного светового пятна на зеркале *4*.

В исходном состоянии на мишени телевизионной трубки *6* излучение лазера сфокусировано в виде светлого штриха минимальной ширины. Электронный луч видикона осуществляет однострочное сканирование изображения штриха в направлении, перпендикулярном к штриху, и с видикона при этом снимается минимальный временной импульс. При перемещении зеркала *4*

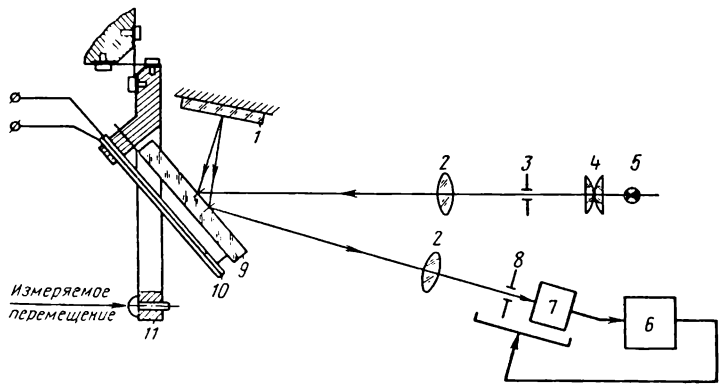


Рис. 37. Датчик линейных смещений со сканированием

в плоскости изображения изменяется ширина светлой полосы. Это размытие штриха приводит к изменению длительности сигнала, снимаемого с трубки *6*. Получаемый электрический сигнал в блоке *7* выработки сигнала рассогласования сравнивается с запомненным исходным сигналом.

Разность длительностей импульсов определяет величину смещения объекта. Кодирование информации в виде, удобном для регистрации, осуществляется в блоке *8*.

Для дистанционного высокоточного измерения линейных смещений может быть применен фотоэлектрический датчик со сканированием, выполненный по схеме, изображенной на рис. 37 [112].

Особенностью такого датчика линейных смещений является зеркальный умножитель, выполненный в виде двух зеркал — подвижного и неподвижного. Подвижное зеркало снабжено электрическим вибратором (пьезокерамической пластинкой), связанным с поворотным зеркалом умножителя.

Устройство для измерения смещений содержит источник света *5*, конденсор *4*, световую марку *3*, объектив *2*, неподвижное зеркало *1*, поворотное зеркало *9*, электромеханический вибра-

тор *10*, оправу на крестообразном шарнире *11*, щель *8*, фотодатчик *7* и следящую систему *6*.

Световая марка *3* объективом *2* и зеркальным умножителем *1*, *9* проектируется в плоскость щели *8*. Зеркало *9* связано с пьезокерамической пластиной вибратора *10*, осуществляющего его колебания с некоторой заданной частотой f.

Амплитуда колебаний световой марки в соответствии со свойствами зеркального умножителя на выходе умножителя будет в k раз больше амплитуды колебаний вибратора (k — коэффициент преобразования зеркального умножителя).

Щель *8* и фотодатчик *7* образуют исполнительный элемент следящей системы и в случае появления рассогласования на входе системы из-за линейных перемещений объекта смещаются в направлении, уменьшающем до нуля это рассогласование. Одновременно с перемещением управляющего элемента перемещается кинематически связанная с ним подвижная часть измерительного устройства.

Применение зеркального умножителя позволяет уменьшить в k раз амплитуду колебаний вибратора по сравнению с амплитудами обычных электромеханических сканирующих устройств и уменьшить в k раз погрешности измерения, связанные с ошибками меры, ошибками интерполяции шага меры (отсчетного устройства).

2. *Фотоэлектрические датчики для угловых измерений.* Для монтажа оборудования и дистанционного наблюдения за взаимным угловым положением конструктивных элементов в ряде случаев применяют фотоэлектрические датчики для угловых измерений (в том числе и углоизмерительные следящие системы). Схемы построения таких датчиков могут быть различными. Рассмотрим две наиболее распространенные схемы.

В схеме прямого измерения излучатель и фотоэлектрическое приемное устройство располагают на расстоянии друг от друга, закрепляя их на базовых поверхностях контролируемых объектов.

При автоколлимационной схеме измерения излучатель и фотоэлектрическое приемное устройство совмещены в одном приборе — автоколлимационной фотоэлектрической трубе, а взаимонаведение оптических систем излучателя и приемника осуществляется специальным отражателем, устанавливаемым на контролируемом объекте.

Автоколлимационные устройства обладают высокой чувствительностью к незначительным поворотам отражателя. Так, при применении в качестве отражателя плоского зеркала при его повороте на угол β лучи отражаются от него на угол 2β. Применяя уголковые зеркальные умножители, чувствительность схемы можно еще увеличить.

При наклоне плоского зеркала на угол $\Delta\beta$ (рис. 38, *а*) отраженный луч поворачивается на угол $2\Delta\beta$ и при фокусном

расстоянии объектива f' смещение автоколлимационного изображения точки в фокальной плоскости объектива с оптической оси системы составит величину

$$\Delta x = \frac{2\,\Delta\beta \cdot f'}{\rho},$$

где $\rho = 206\,265''$.

В случае применения уголкового двухзеркального отражателя (рис. 38, *б*), одно из зеркал которого может поворачиваться вокруг оси C, располагаемой на оптической оси автоколлиматора,

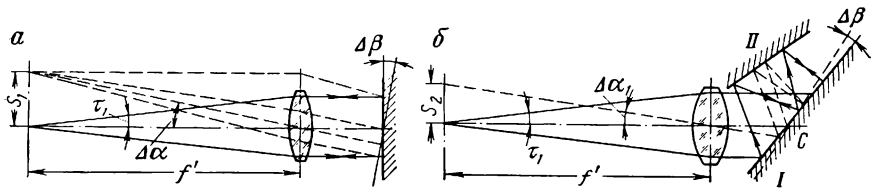


Рис. 38. Схема автоколлимационного способа измерения углов

величина смещения автоколлимационного изображения точки определится выражением

$$\Delta x = \frac{2n \cdot \Delta\beta \cdot f'}{\rho}, \qquad (64)$$

где $\Delta\beta$ — угловое смещение подвижного зеркала; f' — фокусное расстояние объектива; n — число отражений в зеркальном умножителе от подвижного зеркала.

В инженерно-геодезической практике автоколлимационные методы измерения и фотоэлектрические автоколлиматоры находят применение при контроле прямолинейности, отклонений от параллельности плоскостей, расположенных друг против друга, контроля взаимной перпендикулярности плоскостей и т. д.

В табл. 1 [25] представлены типовые схемы применения автоколлимационного метода измерения.

Для изучения динамики и устойчивости углового положения конструктивных элементов сооружений во времени для угловых измерений применяют фотоэлектрические угломерительные следящие системы. При применении следящих систем используют как принцип прямого измерения, так и автоколлимационный способ.

В зависимости от метода выделения информации в оптико-электронном тракте следящие системы подразделяются на амплитудные, время-импульсные, частотные и фазовые.

В ряде случаев при больших по величине углах рассогласования вместо следящих угломерительных систем в инженерно-геодезических измерениях могут использоваться так называемые

датчики накапливающего типа, которые по принципам построения оптической схемы несколько отличаются от других типов датчиков.

Кратко рассмотрим основные принципы построения и конструктивные схемы фотоэлектрических устройств для угловых измерений.

Угловые измерения с применением оптического луча и фотоэлектрических преобразователей могут выполняться по различным схемам, однако общей задачей для них является автоматическое определение относительных перемещений объекта, расположенного в поле зрения измерительного устройства [33].

Основным элементом упомянутой системы является позиционно-чувствительный датчик, который создает на выходе сигнал, соответствующий рассогласованию между оптической осью устройства и направлением на объект измерения.

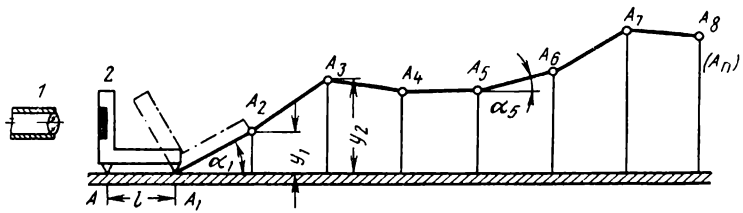
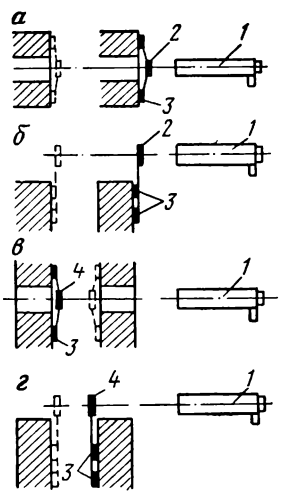
Для сбора лучистой энергии от излучателя и направления ее на светочувствительный элемент позиционно-чувствительного датчика в угломерных устройствах в большинстве случаев применяют объективы. В датчиках могут применяться линзовые, зеркальные, зеркально-линзовые объективы. Объективы фотоэлектрических угломерных устройств характеризуются диаметром входного зрачка, светопропусканием, фокусным расстоянием, величиной аберраций, углом поля зрения.

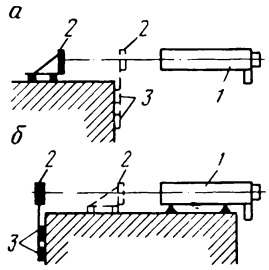
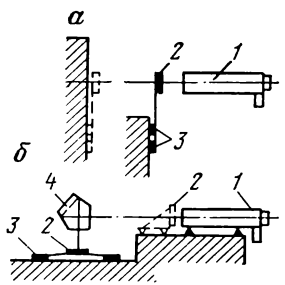
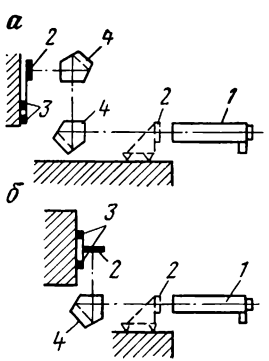
От величины фокусного расстояния объектива и диаметра входного зрачка зависит угол поля зрения системы и начальный сигнал рассогласования на позиционно-чувствительном датчике.

При работе с точечным излучателем или с излучателем, создающим пучок лучей, близкий к параллельному (например, с лазером), при появлении на входе системы углового рассогласования α линейное перемещение центра изображения излучателя в фокальной плоскости объектива определяется величиной $f'\alpha$ (для малых углов α). Таким образом, объектив, являясь первичным преобразователем входной информации, позволяет при угловых измерениях перейти от непосредственного измерения угла к измерению линейных смещений центра создаваемого им изображения на светочувствительной площадке позиционно-чувствительного датчика. Величина коэффициента преобразования в первую очередь определяется фокусным расстоянием объектива. Однако выбирать фокусное расстояние объектива чрезмерно большим не рекомендуется, поскольку влияние тепловых деформаций корпуса прибора может привести к снижению точности угловых измерений и к неоправданному усложнению оптико-механических компенсаторов в схемах следящих угломерных систем.

Комбинация элементов — объектив плюс позиционно-чувствительный датчик — дает возможность вести измерение угловых смещений объекта, на котором расположен излучатель, с высокой точностью, однако в ограниченном угловом диапазоне. Расширение диапазона измерений часто приводит к нелинейности статической характеристики датчика. Поэтому схема угломерных

Таблица 1

№ пп.	Назначение контроля	Схема контроля
1	Контроль прямолинейности направляющих поверхностей: $y_1=\frac{\alpha_1 l}{\rho}$; $y_2=y_1+\frac{\alpha_2 l}{\rho}=\frac{l(\alpha_1+\alpha_2)}{\rho}$; . . . . . . ; $y_n=y_{n-1}+\frac{\alpha_n l}{\rho}=\frac{l}{\rho}\sum_{i=1}^{i=n}\alpha_i$ *1* — автоколлиматор, *2* — зеркало с подставкой	
2	Контроль отклонения от параллельности плоскостей, расположенных друг против друга: *1* — автоколлиматор, *2* — зеркало, *3* — магниты, *4* — двустороннее зеркало	

3	Контроль взаимной перпендикулярности плоскостей: *1* — автоколлиматор, *2* — зеркало, 3 — магниты	
4	Контроль отклонения от параллельности ступенчато расположенных плоскостей: *1* — автоколлиматор, *2* — зеркало, *3* — магниты, *4* — пентапризма	
5	Контроль отклонения от перпендикулярности плоскостей, расположенных ступенчато: *1* — автоколлиматор, *2* — зеркало, *3* — магниты, *4* — пентапризма	

устройств с компенсацией взаимного положения нуль-органа позиционно-чувствительного датчика и изображения излучателя является наиболее распространенной.

Компенсация может осуществляться непосредственным перемещением нуль-органа позиционно-чувствительного датчика или коррекцией положения изображения излучателя в фокальной плоскости объектива за счет использования оптико-механических, электрооптических и других видов компенсаторов.

Измерение величины углового рассогласования на входе угломерного датчика осуществляется специальным отсчетным приспособлением, кинематически или электрически связанным с компенсатором.

Позиционно-чувствительный датчик в целом при такой схеме измерения выполняет роль нуль-индикатора.

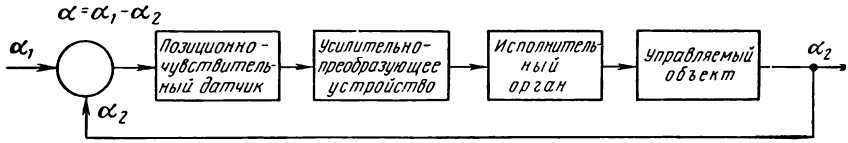


Рис. 39. Структурная схема фотоэлектрической следящей системы

Точность измерения, линейность статической характеристики, динамические свойства угломерного датчика в случае применения компенсационной схемы измерения во многом определяются параметрами компенсатора.

Углоизмерительные следящие системы, как правило, выполнены по компенсационной схеме измерения. Структурная схема фотоэлектрической следящей системы показана на рис. 39.

Как уже отмечалось, позиционно-чувствительный датчик создает на выходе сигнал, соответствующий угловому рассогласованию на входе угломерной системы.

Усилительно-преобразующее устройство служит для усиления сигнала ошибки датчика и преобразования его в сигналы, управляющие работой исполнительного органа. Исполнительный орган воздействует на объект измерения (управляемый объект), уменьшая до нуля ошибку на выходе позиционно-чувствительного элемента. Угловое рассогласование в следящих системах измеряется специальными устройствами, подключенными к выходу исполнительного органа. Применение в схеме угломерных датчиков компенсаторов, обладающих определенным коэффициентом передачи, позволяет достичь высокой точности угловых измерений.

Так, если в схеме следящей углоизмерительной системы в качестве компенсатора применить плоскопараллельную пластинку с коэффициентом передачи $k = 100$ и угол ее поворота отсчетным приспособлением измерить с точностью $10''$, то ошибка измерения угла на входе угломерного датчика (при условии

отсутствия погрешностей в промежуточных звеньях датчика) составит 0,1″.

В настоящее время создано значительное число оптико-электронных угломерных следящих систем. В качестве позиционно-чувствительных датчиков в них используют квадрантные фотоумножители, диссекторы со специальными масками, различные сканирующие устройства.

В позиционно-чувствительных датчиках широко используют такие физические явления, как продольный и магнитоконцентрационный эффекты в полупроводнике, фотоэффект на границе полупроводниковых монокристаллов и т. п. В следящих системах со сканирующими устройствами выявление рассогласования достигается сканированием некоторого участка контролируемого поля по какой-либо траектории (по окружности, по спирали Архимеда и т. п.), позволяющей определить направление и величину смещения. Принцип действия сканирующих следящих систем основан на взаимном перемещении изображения излучателя и анализирующего элемента (диафрагмы и т. п.). В высокоточных следящих системах главным образом используют устройства, основанные на перемещении изображения относительно анализирующего элемента.

В качестве воспринимающего элемента позиционно-чувствительных датчиков углоизмерительных сканирующих следящих систем могут применяться один или несколько фотоприемников, часто специальной конфигурации. Величина углового рассогласования при этом определяется в результате сравнения потоков излучения, поступающих на отдельные фотоприемники или на один фотоприемник, работающий в совокупности с анализатором (координатором) системы.

В фотоэлектронных углоизмерительных следящих системах оптический сигнал преобразуется в поток электронов, переносящих изображение. Электронное изображение перемещается по заранее заданной траектории относительно диафрагмы фотоэлектронного координатора и тем самым определяется величина углового рассогласования на входе системы. В качестве чувствительных элементов при этом широко используют диссекторы.

Использование в следящих оптико-электронных системах в ряде случаев полупроводниковых позиционно-чувствительных устройств дает возможность совместить в таком элементе анализатор изображения (координатор), дающий информацию об угловом смещении излучателя в пространстве, и фотоприемник. Такие следящие системы представляются перспективными для автоматизации инженерно-геодезических измерений.

Принцип действия позиционно-чувствительных фотоприемников основан на использовании продольного фотоэффекта в полупроводниках; выходной сигнал зависит от положения освещенной зоны на чувствительной поверхности.

Установлено, что помимо первичного напряжения, возникающего в полупроводнике в p — n-переходе при облучении его светом, одновременно протекают и малые токи в боковом направлении [44]. По параметрам фототока можно определить величину и направление смещения светового пятна относительно оптической оси следящей системы.

Такой полупроводниковый фотоприемник (рис. 40, *а*) представляет собой пластинку, например пластинку n-германия *5* с присадкой из индия *6*, к поверхности которой с противоположных

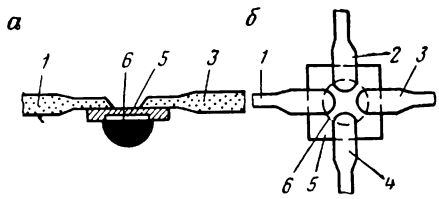


Рис. 40. Позиционно-чувствительный фотоприемник

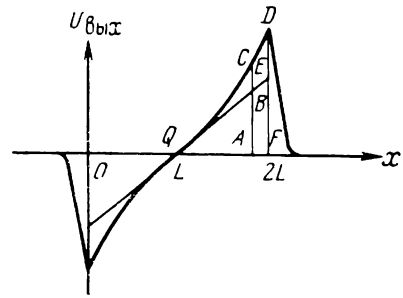


Рис. 41. Статическая характеристика позиционно-чувствительного фотоприемника

концов прикреплены токосъемные электроды *1*, *2*, *3*, *4*. Для определения положения изображения по двум координатам фотоприемная пластинка изготовляется в виде круга или квадрата, а выходные контакты располагаются по окружности с интервалами 90° (рис. 40, *б*).

Если световое пятно изображения излучателя попадает на полупроводник между контактами (например, *1* и *3*), токи будут равны по величине и противоположно направлены, создавая равное падение напряжения, поэтому суммарное напряжение на контактах оказывается равным нулю. При смещении светового пятна к одному из контактов баланс напряжений нарушается и разность напряжений соответствующего знака может быть зафиксирована измерительным прибором.

Суммарное напряжение на выходе фотоприемника для случая однокоординатного смещения светового пятна определяется выражением [44]

$$U_{вых} = \frac{2\rho}{q\,(d - x_1)}, \qquad (65)$$

где δ — удельное сопротивление; q — площадь чувствительного элемента; $2d$ — расстояние между базовыми контактами; x — текущая координата светового пятна; I — боковой фототок.

Статическая характеристика позиционно-чувствительного фотоприемника приведена на рис. 41. Отношение отрезков CB/BA

является относительной нелинейностью характеристики в точке A. Зависимость изменения выходного напряжения от положения светового пятна на рабочем участке фотоприемника линейна; порог чувствительности составляет 0,015 мкВт, а постоянная времени 5 мкс. Разрешающая способность положения светового пятна весьма высокая и при определенных условиях достигает нескольких мкм. В рабочие системы фотоприемники с боковым фотоэффектом могут включаться по фотодиодной и вентильной схемам режимов работы.

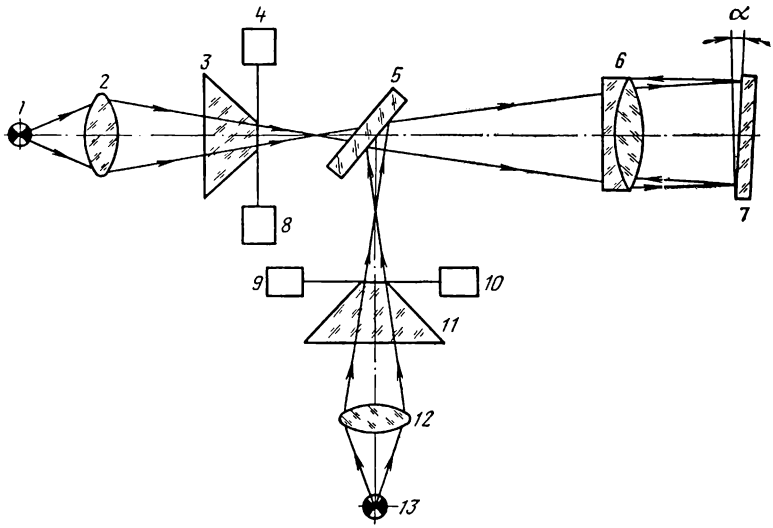


Рис. 42. Автоколлимационный фотоэлектрический датчик

Ниже рассматриваются некоторые варианты конструктивного построения схем угломерных фотоэлектрических датчиков.

Примером реализации автоколлимационного фотоэлектрического угломерного датчика является схема, показанная на рис. 42. Датчик [119] содержит измерительный и опорный каналы с источником света, двумя фотоприемниками и усеченной пирамидой (анализатором), у которой площадь прямоугольной фаски в вершине пирамиды в два раза больше площади фаски усеченной пирамиды основного измерительного канала. Особенностью этого датчика является применение в схеме управления логометрического преобразователя, позволяющего компенсировать температурные погрешности и повысить линейность статической характеристики.

Датчик содержит автоколлимационную оптическую систему формирования изображения фасок призм *3*, *11*, источники света *1*, *13*, автоколлимационное зеркало *7*, светоделительную пластину *5*, фотоприемники *4*, *8*, *9*, *10* и логометрический преобразователь (на рис. не показан).

Фотоприемники *4*, *8*, *9*, *10* включены попарно в мостовые схемы, на входы логометрического преобразователя поступают сигналы и от измерительного и от опорного каналов схемы. Нить накала источников света *1* и *13* проецируется конденсаторами *2* и *12* в вершины прямоугольных призм *3* и *11* с небольшим перекрытием. В отличие от боковых граней, которые посеребрены, основание и вершина призмы прозрачны.

Вершины призм *3* и *11* располагаются в фокальной плоскости объективов *6* и *12*.

При перпендикулярном расположении отражающей поверхности зеркала *7* к оптической оси автоколлиматора параллельный пучок отраженных от зеркала лучей направляется в объектив системы, тогда автоколлимационное изображение фасок совпадает с самими фасками в каждом из каналов схемы. Поскольку оптическая схема датчика содержит полупрозрачную пластинку *5*, то на изображение фаски измерительного канала накладывается изображение фаски опорного канала и наоборот.

Так как площадь фаски призмы опорного канала больше площади фаски призмы измерительного канала, то изображение фаски опорного канала перекрывает фаску измерительного канала и с фотоприемников *4* и *8* в измерительную схему поступают равные сигналы, в то время как на выходе фотоприемников *9*, *10* сигналы отсутствуют. Соответствующей балансировкой схемы добиваются пулевого сигнала на выходе схемы при перпендикулярном к оптической оси автоколлиматора положении зеркала *7*.

При повороте зеркала *7* происходит синхронное смещение изображений фасок и в схеме нарушается баланс, причем на выходе моста измерительного канала электрический сигнал пропорционален смещению изображения фасок измерительного и опорного каналов. Кроме того, в зависимости от направления поворота зеркала *7* (при малых углах) на один из фотоприемников *9* или *10* попадает световой поток изображения фаски только опорного канала. Если же угол поворота зеркала достаточно велик и превышает угловой диапазон измерительного канала (диапазон определяется угловыми размерами фаски и фокусным расстоянием объектива), то измерительным каналом станет опорный, а опорным будет измерительный. Такое распределение функций измерительного и опорного каналов обеспечивается электрической схемой обработки сигналов, при которой сигналы разбаланса мостовых схем обоих каналов подаются на входы электронного логометрического преобразователя, выходная величина которого пропорциональна отношению двух входных сигналов U_a и U_b. Входные сигналы U_a и U_b в свою очередь являются функциями поворота зеркала.

Фотоэлектрический автоколлиматор фирмы «Хилгер — Ваттс» [132] представляет собой сочетание автоколлиматора с фотоэлектрическим микроскопом. Фотоэлектрический микроскоп дает

Таблица 2

Тип автоколлиматора	Пределы измерения, ″	Максимальная рабочая дистанция, м	Непосредственные отсчеты, ″	Точность при использовании полной шкалы
ТА-80	10	12	0,5	2%
ТА-81	20	8	1,0	2%
ТА-82	100	2,5	5,0	2%
ТА-3	600	12	0,1	2″
ТА-53	600	20	0,1	2″

возможность совмещать с большой точностью оптическую ось микроскопа с центром автоколлимационного изображения.

Приборы фирмы «Хилгер — Ваттс» отличаются один от другого чувствительностью, диапазоном измерений, точностью и максимальной рабочей дистанцией.

В табл. 2 приведены основные технические характеристики некоторых типов фотоэлектрических автоколлиматоров.

Обобщенная схема указанных фотоэлектрических автоколлиматоров показана на рис. 43 [137].

Световой пучок, создаваемый лампой накаливания *6*, собирается линзой *7* осветителя и направляется на полупрозрачную пластинку *5*, где разделяется на два световых потока.

Отраженный от пластинки *5* пучок лучей освещает сетку *8* с перекрестием, которая расположена в фокальной плоскости объектива *9*, и направляется на зеркало *10*, связанное с измеряемым объектом. Отразившись от зеркала *10*, световые лучи вновь возвращаются в систему и, пройдя сквозь пластинку *5*, попадают на микрообъектив *4* автоколлиматора. Микрообъектив *4* проектирует изображение с плоскости сетки *8* на плоскость сетки *2* с некоторым увеличением (около 3×). Сетка *2* установлена в фокальной плоскости окуляра *1* (увеличение около 12×). На сетке *2* нанесены два близко расположенных штриха, параллельных штриху сетки *8*.

Часть светового потока, разделяемого пластинкой *3*, направляется в канал фотоэлектрической регистрации, состоящей из сканирующей щели *12*, электромагнитного вибратора *11*, линзы *13* и фотоприемника *14*.

Стеклянная пластинка *3*, сетка *2*, вибратор *11* со щелью *12* укреплены на каретке, которая с помощью микрометренного винта может перемещаться в направлении, перпендикулярном к вертикальному штриху сетки *8*. Барабанчик винта имеет оцифровку с ценой деления до десятых долей угловой секунды.

Сигнал от фотоприемника *14* поступает на усилитель переменного тока *15* и далее на кольцевой фазочувствительный демодулятор *16*. Опорным напряжением кольцевого демодулятора

служит напряжение сетевой частоты, снимаемое с обмотки трансформатора, питающего электромагнитный вибратор *11*.

При совпадении центра колебаний щели с центром изображения штриха на выходе усилителя электрический сигнал представляет собою напряжение переменного тока, частота которого в два раза больше частоты модуляции, а на выходе демодулятора при этом отсутствует постоянная составляющая тока и индикатор *17* (гальванометр) показывает нуль.

При несовпадении вышеуказанных центров колебания и изображения, что соответствует угловому развороту зеркала *10*,

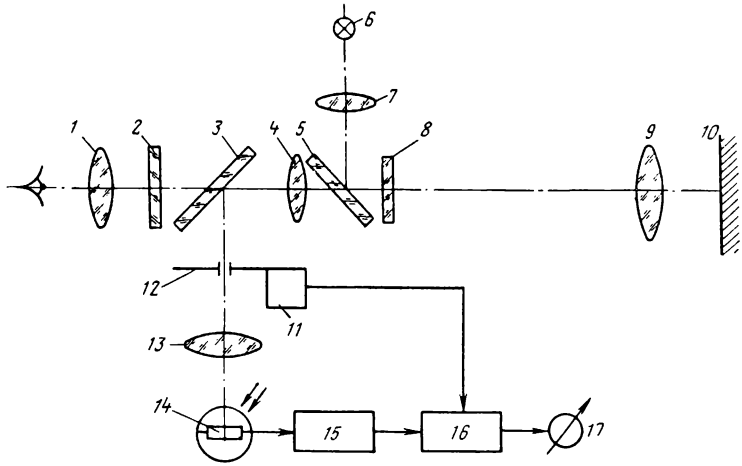


Рис. 43. Схема фотоэлектрического автоколлиматора

с выхода усилителя *15* на демодулятор *16* поступает переменное напряжение сетевой частоты, фаза которого определена направлением смещения центра автоколлимационного изображения с центра колебаний щели, а на выходе демодулятора появляется напряжение постоянного тока соответствующей полярности.

Сетка *2* с биштрихом при помощи подвижной каретки устанавливается так, чтобы при точном совмещении центра изображения с центром колебаний изображение находилось внутри биштриха, а электрический нуль — индикатор схемы — показывал нулевой отсчет. Таким образом, визуальный канал служит не только для непосредственного отсчета, но и для контроля работы фотоэлектрического канала.

Один из возможных вариантов применения в инженерной геодезии фотоэлектрической автоколлимационной схемы измерения представлен на рис. 44 [62].

Такое фотоэлектрическое измерительное устройство предназначено для измерения угловых смещений из-за влияния атмосферы оптического луча, например лазерного. Устройство включает в себя три основных блока — излучатель *4*, отражатель *1*

и детектор *3* положения луча. В рассматриваемой схеме измерительного устройства детектор расположен коаксиально световому пучку на том же конце линии, что и излучатель. Поскольку излучатель во время измерений занимает неизменное положение, то такое расположение детектора позволяет четко задать начальное положение линии относимости, т. е. самого светового луча.

Детектор *3* образован несколькими уголковыми отражателями и фотоэлектрическими элементами, размещенными равномерно и симметрично вокруг излучателя.

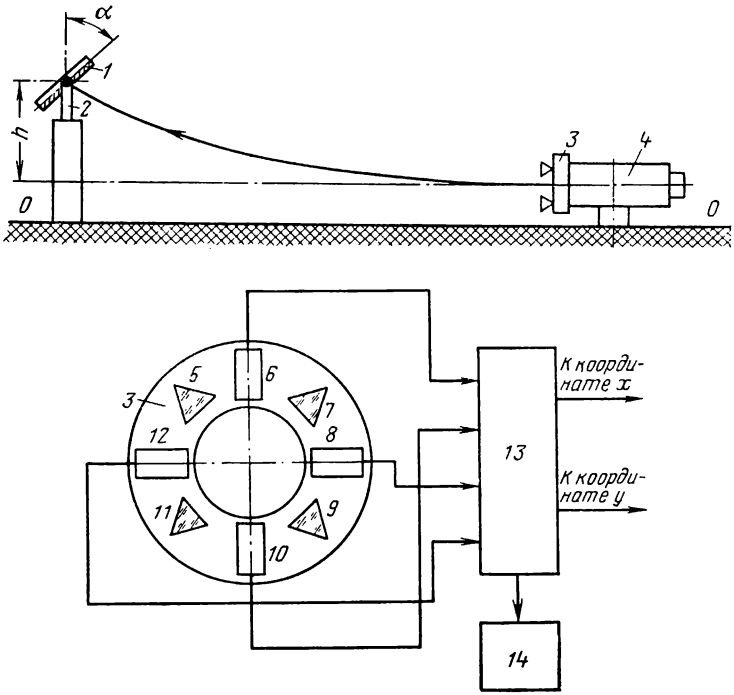


Рис. 44. Устройство для измерения угловых смещений луча

В качестве отражателя используют плоское зеркало, укрепленное в специальной подставке *2*, позволяющей изменять его положение в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поворот зеркала может осуществляться вручную микрометренным винтом или сервоприводом. Вследствие рефракции световой луч в атмосфере искривляется и приходит на зеркало *1* под некоторым углом. Чтобы его вернуть вновь в выходной зрачок излучателя, зеркало *1* необходимо повернуть на угол α. Высота луча у отражателя, вычисленная по отношению к первоначальной линии относимости 0—0, определится как

$$h = \frac{\alpha s}{2}.$$

Уголковые призмы *5*, *7*, *9*, *11* расположены в плоскости выходного зрачка излучателя *4*, поэтому световой луч, отраженный от зеркала *1* при перпендикулярном положении его к приходящему лучу, возвращается на уголковые призмы и, отразившись на них, вновь направляется на зеркало *1*. Наблюдатель, находящийся у зеркала *1*, видит при этом равномерно освещенные уголковые призмы. Перпендикулярность отражающей поверхности зеркала *1* к приходящему световому лучу, можно определить и фотоэлектрическим устройством, входящим в состав детектора и составленным из четырех фотоприемников *6*, *8*, *10*, *12* и электронной схемы управления. Каждые два диаметрально расположенных фотоприемника включены в электрическую схему встречно и по их разностному сигналу можно судить о направлении распространения луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

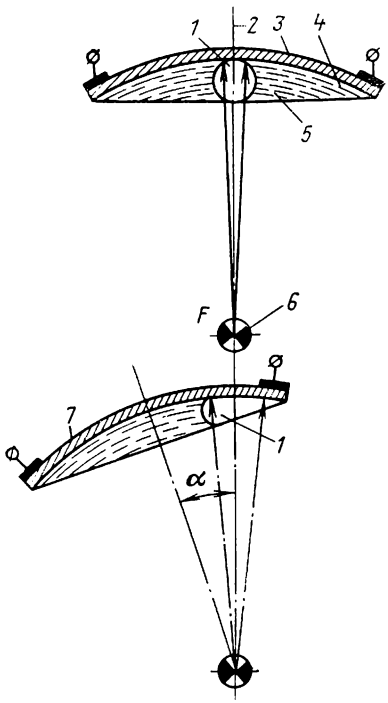


Рис. 45. Фотоэлектрический датчик с ампулой

Сигналы с фотоприемников управляют работой исполнительных механизмов с сервоприводами, закрепленными на подставке *2* и позволяют дистанционно (по кабельной линии связи) ориентировать в двух плоскостях зеркало *1*. Выработка команд исполнительным органам в схеме прибора осуществляется блоком управления *13*, а регистрация величины изменения угла α выполняется отсчетным устройством *14*.

Интересным в конструктивном отношении является фотоэлектрический датчик углов наклона объектов с автоматической регистрацией с ампулой (рис. 45) [81]. Ампула выполнена в виде шарового сегмента, в фокусе которого расположен источник света. Пузырек воздуха служит диафрагмой, изменяющей освещенность фотоэлектрического регистратора. Источник света *6* располагается в фокусе сферической поверхности *3*, на которой размещен фотоэлектрический преобразователь *7*. Ампула заполнена светонепроницаемой жидкостью *4* так, что внутри ампулы остается воздушный пузырек *1*. Основание *5* ампулы представляет собой прозрачную для света плоскость. Отвесной линией в датчике является оптическая ось *2*, проходящая от источника света *6* через центры поверхности *5*, пузырек *1* и поверхность *3*.

При наклоне объекта на некоторый угол площадь поперечного сечения воздушного пузырька увеличивается, что в свою очередь увеличивает светопропускание ампулы. Сигналы с фотоэлектрического преобразователя *7* при этом изменяются пропорционально углу наклона. При помощи описанного датчика можно осуществлять дистанционные наблюдения.

Рассмотренные выше примеры фотоэлектрических датчиков не охватывают всего многообразия известных принципов и конструктивных схем. Возможность применения их на практике следует определять в каждом конкретном случае исходя из существа решаемой технической задачи, условий наблюдения, требуемых точностей измерения, необходимой степени автоматизации.

Следует отметить, что фотоэлектрические датчики наряду с выполнением самостоятельной измерительной задачи часто могут применяться в геодезических приборах в качестве составных его элементов — отсчетных, преобразующих и т. п.

§ 12. ДИССЕКТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В последние годы внимание исследователей и инженеров-разработчиков новой геодезической аппаратуры обратилось к фотоэлектронным устройствам нового типа — диссекторам. Удачное совмещение в диссекторах высокочувствительного фотоприемника с электронным устройством обработки информации указывает на их перспективность при решении задач автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений.

Диссектор — передающая телевизионная трубка без накопления зарядов (мгновенного действия). При проецировании оптического изображения на плоский полупрозрачный фотокатод диссектора поэлементное преобразование изображения в последовательность электрических сигналов осуществляется путем отклонения сфокусированного электронной линзой потока электронов (электронного изображения) относительно вырезающего отверстия диафрагмы диссектора.

Мгновенное значение фототока, определяемое потоком электронов, проходящих через вырезающее отверстие, усиливается расположенным за отверстием вторичным электронным умножителем (ВЭУ) и представляет собой видеосигнал от соответствующего элемента изображения [44].

Диссектор, схема которого приведена на рис. 46, содержит три основных элемента: входную камеру *А*, где осуществляется преобразование оптического изображения в электрооптическое и его фокусировка; секцию *Б*, предназначенную для отклонения электронного изображения, и секцию *В* послекоммутационного усиления, содержащую вторичный электронный умножитель.

Преобразование светового изображения в электрический сигнал происходит на фотокатоде *5* (см. рис. 46) — полупрозрачном

светочувствительном слое, нанесенном на внутреннюю поверхность фотокатодного стеклянного диска. Механизм преобразования — внешний фотоэффект.

Фотоэлектроны, вылетающие с фотокатода, благодаря совместному действию электродов *4* и *6* и фокусирующей катушки *1* переносятся в плоскость сканирующей диафрагмы *2* и фокусируются. Две пары отклоняющих катушек *3* создают в диссекторе электромагнитное поле, которое разворачивает электронное изображение относительно вырезающего отверстия диафрагмы *2*.

Закон отклонения (сканирования) электронного изображения может быть задан любым и определяется в каждом конкретном случае решаемой задачей. Высокий коэффициент усиления ВЭУ

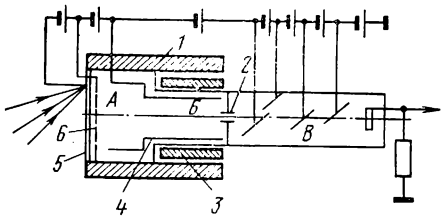


Рис. 46. Схема устройства диссектора

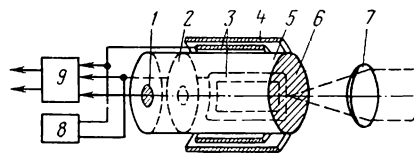


Рис. 47. Время-импульсное следящее устройство с диссектором

($10^5 \div 10^7$) и его малые внутренние шумы обеспечивают значительное превышение уровня выходного сигнала диссектора над шумами предварительного усилителя.

Выпускаемые промышленностью диссекторы обладают линейной световой характеристикой в широком диапазоне освещенностей, высокой механической прочностью, виброустойчивостью, широким температурным диапазоном (от —60 до +85° С) и сохраняют работоспособность при относительной влажности до 95—98% при 40° С, имеют практически неограниченный срок службы и малое потребление энергии, обеспечивают хорошую однородность фона.

В диссекторе величина передаваемого элемента изображения совпадает с величиной вырезающего отверстия диафрагмы. При анализе изображения, имеющего резкие границы освещенности, выходной сигнал трубки нарастает постепенно, т. е. фронт импульса затягивается на величину диаметра электронного изображения. Такой характер переходного процесса обусловлен распределением энергии в электронном изображении и не зависит от освещенности.

Фотоэлектронное устройство, состоящее из объектива и помещенного в его фокальной плоскости диссектора, с успехом может решать задачу измерения угловых смещений объекта, если последний имеет излучатель, укрепленный на его базовой поверхности. Схема следящего время-импульсного устройства с диссектором показана на рис. 47.

Объективом *7* излучение от объекта фокусируется на поверхность фотокатода *6* диссектора *5*. Электронное изображение объекта, сфокусированное катушкой *4*, под действием отклоняющей системы *3* проецируется в плоскость диафрагмы *2*. Траектория перемещения развертывающего отверстия определяется изменением во времени отклоняющих напряжений, задаваемых генератором *8*. Сигнал, снимаемый с анода *1*, сравнивается в преобразовательном устройстве *9* с опорными сигналами (напряжением, подаваемым на катушки). В результате сравнения двух указанных сигналов на выходе преобразовательного устройства *9* выделяется сигнал рассогласования по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Как уже отмечалось, диссекторы дают возможность достаточно простыми средствами формировать различные развертки. Развертки могут осуществляться двумя способами. В первом случае диафрагма диссектора выполняется в виде геометрической фигуры правильной формы (например, в виде крестообразного отверстия), а электронное изображение точечного объекта развертывается по определенной траектории (например, по квадратной траектории или по окружности). Во втором случае отверстию диафрагмы придается круглая или квадратная форма, и изображение источника излучения преобразуется оптическими элементами, расположенными перед диссектором, в фигуру определенной геометрической формы (например, крестообразной формы), электронное изображение источника излучения развертывается по квадратной, круговой или другой траектории.

В первом случае на отклоняющие катушки диссектора подается напряжение треугольной формы одинаковой амплитуды или синусоидальное напряжение, но сдвинутое на 90° по фазе.

Если рассогласование на входе следящей системы отсутствует, то траектория развертки симметрична относительно центра креста. На выходе диссектора присутствует сигнал в виде импульсов, следующих через равные временные интервалы, поскольку развертка пересекает плечи крестообразного отверстия в симметричных точках. Если энергетический центр изображения излучателя смещается с оси симметрии креста, то на выходе диссектора появляется сигнал рассогласования и периодичность следования импульсов нарушается.

Сигнал рассогласования при смещении объекта по оси x на величину δ_x определяется выражением [44]

$$U_{\text{вых}} = k\,\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \tag{66}$$

где k — некоторый коэффициент, определяемый параметрами схемы; t_1, t_2 — временные интервалы между импульсами диссектора.

При круговой развертке (рис. 48, *а*)

$$U_{\text{вых}} = \frac{2k}{\pi \arcsin 2\delta_x/D} = \frac{2k}{\pi \arcsin 2f\alpha_x/D}, \tag{67}$$

где f — фокусное расстояние объектива; α_x — угловое рассогласование в плоскости x; D — диаметр траектории развертки.

Схемы управления диссектором строят так, чтобы одиночные импульсы на выходе диссектора можно было преобразовать в прямоугольные импульсы разной полярности. По разности в длительности ($t_1 - t_2$) этих импульсов можно судить о величине углового смещения изображения источника излучения, а по полярности — о направлении углового рассогласования.

При развертке по квадратной траектории (рис. 48, *б*)

$$t_1 = a(2D + 2\delta_x); \quad (68)$$

$$t_2 = a(2D - 2\delta_x), \quad (69)$$

где D — длина одного плеча квадратной развертки.

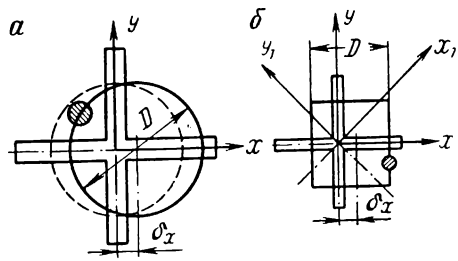


Рис. 48. Круговая и квадратная развертки изображения

С учетом (66) при малых рассогласованиях

$$U_{\text{вых}} = \frac{k\delta_x}{D} = kf\alpha_x/D. \quad (70)$$

Во втором из рассматриваемых случаев работы следящей системы с диссектором для формирования изображения источника в виде креста используют цилиндрическую оптику (рис. 49) [44]. Тогда цилиндрические линзы *3* и *12* фокусируют изображение источника в виде креста на светочувствительную площадку диссектора *8*, а электронное изображение креста развертывается по квадратной или круговой траектории относительно отверстия в диафрагме.

Полупрозрачное зеркало *2* осуществляет разделение светового потока *1*, приходящего от излучателя, на два световых пучка, каждый из которых направляется на цилиндрические линзы *3* и *12* (второй пучок направляется при помощи зеркала *13*). Цилиндрические линзы *3* и *12* формируют на фотокатоде *4* диссектора *8* изображение излучателя в виде симметричного креста.

Перенос электронов в плоскость диафрагмы *5* осуществляется магнитным полем катушки *11* диссектора. Генератор развертки *7* подает напряжения треугольной формы, имеющие одинаковую амплитуду, но сдвинутые по фазе на 90° на две пары отклоняющих катушек *9* и *10*. Вместо напряжений треугольной формы могут применяться синусоидальные равной величины и сдвинутые на 90°. Катушки в диссекторном датчике располагают таким образом, чтобы одна пара отклоняла электроны в направлении оси y, а другая — в направлении оси x (рис. 50).

В зависимости от вида развертки перекрестие в плоскости диафрагмы перемещается по различным траекториям: по квадратной траектории (рис. 50, *а* и *б*) в случае использования треугольных развертывающих напряжений и по круговой (рис. 50, *в* и *г*) траектории в случае использования синусоидальных развер-

тывающих изображений [44]. Принцип обработки время-импульсных сигналов в преобразовательном устройстве *6* аналогичен рассмотренному для первого случая.

Во время-импульсных датчиках угловых смещений и следящих системах с диссекторами могут быть применены и другие виды развертки: розеточная, крестообразная, строчная, спиральная и др.

В диссекторных датчиках информацию о рассогласовании между оптической осью и направлением на источник излучения

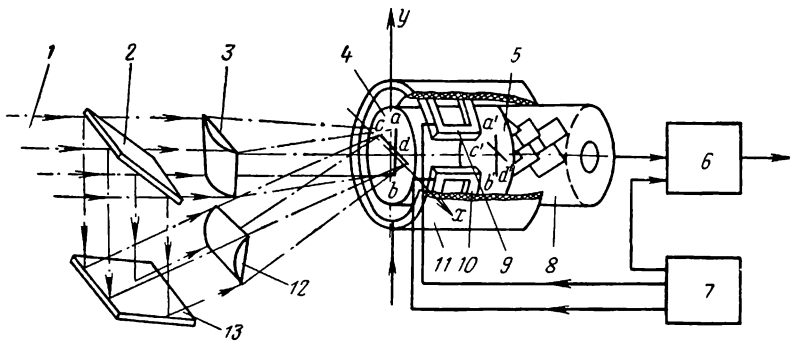


Рис. 49. Формирование крестообразного изображения цилиндрической оптикой

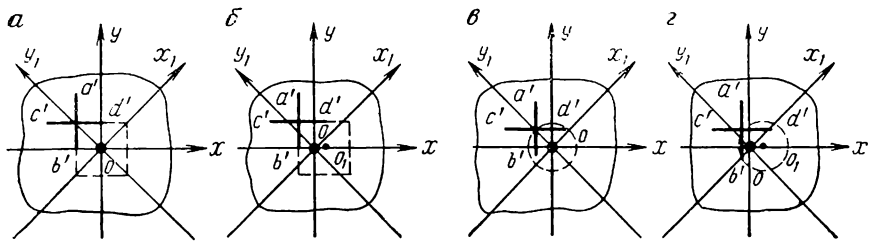


Рис. 50. Траектории движения изображения в следящем устройстве с диссектором

можно получать и на основе определения сдвига фаз между сигналом, создаваемым излучением объекта, и некоторым опорным сигналом, который вводят в систему для начала отсчета.

Поскольку при обработке информации об угловых смещениях помимо направления смещения важно знать и его величину, то фотоэлектронные датчики, как правило, строят по схемам, в основе которых лежит амплитудно-фазовый метод выделения информации. На рис. 51 показана схема амплитудно-фазового следящего устройства с диссектором.

В таких устройствах (рис. 51, *а*) диафрагма диссектора имеет круглое отверстие (рис. 51, *б*), концентричное с осью диссектора

и оптической осью угломерного устройства, траектория сканирования — окружность [45].

Для создания в схеме управления диссектором вращающегося магнитного поля, которое перемещало бы электронное изображение излучателя объекта в плоскости диафрагмы диссектора по окружности, подаются синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе на 90° (U_y — на катушки, отклоняющие электроны по оси y, U_x — для оси x).

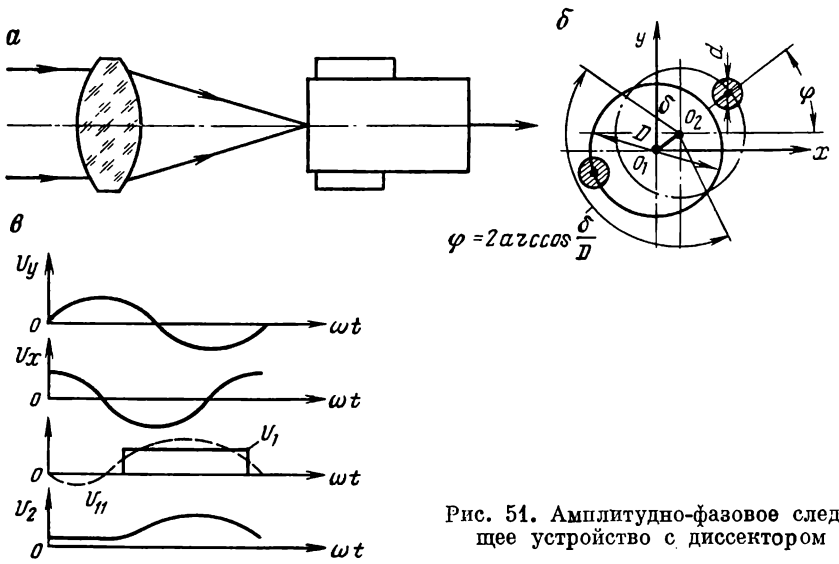


Рис. 51. Амплитудно-фазовое следящее устройство с диссектором

Амплитуды напряжений U_x и U_y выбирают такими, чтобы диаметр окружности траектории сканирования был равен диаметру D отверстия диафрагмы диссектора.

Если рассогласования на входе угломерного устройства нет, то окружность, по которой перемещается электронное пятно, концентрична с отверстием диафрагмы и с выхода диссектора снимается некоторый постоянный сигнал, который не проходит в усилитель через разделительную емкость на входе усилителя.

При появлении углового рассогласования окружность траектории сканирования становится эксцентричной с отверстием диафрагмы диссектора и в сигнале диссектора появляется переменная составляющая (рис. 51, *в*).

Величина и направление смещения излучения в двух координатах с оптической оси угломерного устройства определяется в электронных блоках схемы управления на основе сравнения первой гармоники сигнала диссектора с отклоняющими (опорными) напряжениями U_x и U_y.

При малых угловых рассогласованиях величина смещения может быть выражена [44] как

$$\delta = \delta_x |\cos\varphi|^{-1} = f\alpha_x |\cos\varphi|^{-1}, \tag{71}$$

где δ_x — смещение изображения по оси x, $\delta_x \approx f\alpha_x$; f — фокусное расстояние объекта; α_x — угловое рассогласование на входе оптической системы; φ — полярный угол.

Выходные напряжения диссектора в зависимости от углового рассогласования α (при $\delta = d/2$) могут быть представлены следующими выражениями:

$$U_{\text{вых}_x} = -\frac{2}{\pi N S_b \Phi k_д \sqrt{1-\left(\frac{f\alpha_x}{D\cos\varphi}\right)^2}\cos\varphi}; \tag{72}$$

$$U_{\text{вых}_y} = -\frac{2}{\pi N S_b \Phi k_д \sqrt{1-\left(\frac{f\alpha_y}{D\sin\varphi}\right)^2}\sin\varphi}, \tag{73}$$

где N — коэффициент использования светового потока; S_b — чувствительность по напряжению; Φ — поток излучения, поступающий на чувствительный элемент; $k_д$ — коэффициент, учитывающий параметры схемы демодулятора.

При $\delta \leqslant d/2$ эта зависимость выражается приближенной формулой [44]

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{NS_b}{2\pi\left[\frac{\arcsin(d^2+4\delta^2+4D\delta)}{2d(D+2\delta)} - \frac{\arcsin(d^2+4\delta^2-4D\delta)}{2d(D+2\delta)}\right]}. \tag{74}$$

При $\delta \leqslant d/2$ позиционная характеристика датчика линейна, что особенно важно для компенсационных систем измерения в больших диапазонах угловых смещений.

Широкие функциональные возможности диссекторных датчиков в сочетании с простотой получения различных траекторий сканирования позволяют, в принципе, на основе диссекторов создать целый класс новых автоматических геодезических приборов, в том числе и управляемых дистанционно.

§ 13. ДАТЧИКИ, ОСНОВАННЫЕ НА МУАРОВОМ ЭФФЕКТЕ

Для измерения линейных перемещений часто применяют устройства, содержащие две взаимоперемещающиеся решетки — растры. При взаимном перемещении растров можно фотоэлектрическим способом подсчитать число импульсов, соответствующее числу взаимных перекрытий штрихов решеток и, зная шаг решетки, определить величину смещения. Чтобы можно было различать направления перемещения, считывающее фотоэлектрическое устройство должно содержать опорный измерительный канал,

оптическая ось его должна быть смещена относительно оптической оси считывающего канала на половину шага решетки.

Чувствительность таких растровых устройств обратно пропорциональна шагу решетки. Технология изготовления решеток в настоящее время достаточно хорошо развита и позволяет в отдельных случаях наносить до 2000 штрихов на 1 мм. При использовании таких дифракционных решеток можно получить изменение светового потока от минимума до максимума при перемещении 0,25 мкм. Однако создание отсчетных устройств для растровых высокоточных датчиков является довольно сложной задачей.

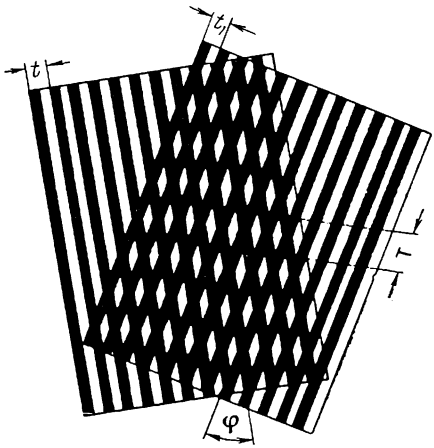


Рис. 52. Схема образования муаровых полос

Эти трудности существенно можно уменьшить, если величину взаимного сдвига решеток определять по изменению муаровой картины, возникающей при определенной схеме наложения решеток. Такие растры в сочетании со считывающим устройством образуют муаровый датчик перемещений. Для измерения линейных перемещений применяют обычно две стеклянные пластины с нанесенными на них штрихами параллельными длинной стороне пластины. Обе пластины скреплены между собою осью вращения, сдвинутой к одному из краев пластины (рис. 52).

Толщину штрихов растра выбирают равной просветам между ними.

Шаг T муаровых полос в зависимости от шага решеток t, t_1 и угла φ пересечения штрихов сопрягаемых растров определяется формулой [6]

$$T = \frac{tt_1}{\sqrt{t^2 + t_1^2 - 2tt_1 \cos\varphi}}. \qquad (75)$$

При $t = t_1$

$$T = \frac{t}{2\sin\frac{\varphi}{2}}. \qquad (76)$$

Муаровые полосы, образованные при наложении темных штрихов одной решетки на светлые полосы другой, наклонены к линиям растра под углом $\alpha = 90° \pm \varphi/2$.

Для повышения точности измерения линейных смещений параметры растров подбирают такими, чтобы с перемещением

сопрягаемого растра на один шаг в перпендикулярном направлении муаровые полосы другого также перемещались на один шаг, превосходящий в десятки (или даже в сотни) раз смещение растров относительно друг друга. Подсчитывание числа муаровых полос в кадровой рамке датчика осуществляется фотоэлектрическим устройством, совершающим сканирование вдоль поля кадровой рамки. Управление перемещением считывающего устройства и запись информации может производиться с пульта электронного блока.

Муаровые датчики, образованные параллельно-линейными растрами, обладают важным для инженерно-геодезических целей свойством накапливать информацию о смещениях во времени.

Простота конструкции, высокая точность измерения (до сотых долей мм) и возможность полной их автоматизации позволяет считать муаровые датчики весьма перспективными для применения в инженерной геодезии [6].

§ 14. МАЯТНИКОВЫЕ ДАТЧИКИ

В последнее время в инженерно-геодезических измерениях начали применяться маятниковые датчики (маятниковые уровни). В таких датчиках механические перемещения маятника преобразуются в электрический сигнал, регистрируемый наблюдателем визуально по шкале стрелочного прибора или самопишущим прибором. В маятниковых датчиках применяются три типа преобразователей: магнитные, фотоэлектрические и индуктивные [13].

Назначение преобразователя заключается в выработке электрического сигнала, указывающего, что маятник достиг заданного критического угла наклона (релейные датчики) или характеризующего поведение конструктивных элементов сооружений во времени в некотором угловом диапазоне.

Маятниковые датчики имеют небольшие габариты, достаточно высокую чувствительность (до .1″), позволяют измерения и съем информации вести дистанционно. Они могут найти самое широкое применение при наблюдении за устойчивостью конструктивных элементов инженерных сооружений, при монтаже и выверке оборудования.

Рассмотрим некоторые схемы маятниковых датчиков.

Датчик-сигнализатор предельных углов наклона объекта представлен на рис. 53 [26]. Принцип действия его основан на замыкании электрической цепи токопроводящим шаром при превышении датчиком допустимого угла наклона. Датчик состоит из корпуса *3*, основания *4*, выполненного из изоляционного материала, на котором укреплен постоянный магнит *5*. Контактные пластины *2* датчика закреплены одним концом в изоляционном кольце *6* и изогнуты по радиусу, большему радиуса шара *1*. Схема включения контактных пластин в электрическую цепь такова, что замыкание любой соседней пары контактов приводит

к замыканию электрической цепи. С этой целью контактные пластины *2* соединены через одну с плюсовыми и минусовыми полюсами электрической цепи.

При строго вертикальном положении рабочей оси датчика шар *1* опирается на изоляционное кольцо *6* и фиксируется удерживающим магнитом *5*.

При наклоне объекта на угол, превышающий угол настройки, шар накатывается на контактные пластины и замыкает их. Давление шара *1* на две контактные пластины *2* при этом распределено равномерно и по величине составляет не менее половины веса шара. Надежность контактирования при этом достаточно высокая.

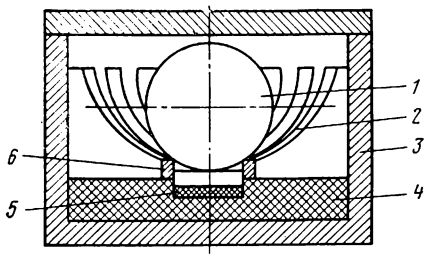


Рис. 53. Маятниковый датчик-сигнализатор

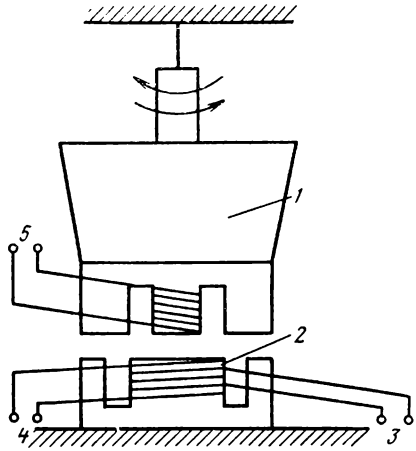


Рис. 54. Маятниковый датчик с индуктивным преобразователем

Настройка такого датчика осуществляется соответствующим подбором удерживающего магнита или изменением диаметра отверстия изоляционного кольца.

Устройства для автоматического контроля угла наклона объектов могут быть выполнены, как указывалось выше, с применением индуктивных преобразователей [122], принципиальная схема его показана на рис. 54.

Такие датчики содержат чувствительный элемент *1* в виде маятника на пространственном подвесе и высокочастотный трансформаторный преобразователь *2*.

Высокочастотный трансформаторный преобразователь содержит две катушки *4* и *5* положительной обратной связи транзисторного генератора.

Катушки располагаются на ферритовых сердечниках и схема их включения обеспечивает положительную обратную связь генератора для поддержания в схеме автоколебаний.

Преобразователь датчика выполнен в виде контурной катушки *3* и катушки обратной связи *4*, индуктивно связанных с чувствительным элементом и включенных в цепь автогенератора. При углах наклона маятника, превышающих допустимый за-

данный угол, за счет взаимного смещения катушек происходит срыв колебаний автогенератора и этот момент фиксируется измерительной схемой.

Маятниковый датчик со струнным преобразователем (рис. 55) [49] дает высокую точность и позволяет вести дистанционные измерения. В основу принципа действия датчика положено изменение частоты собственных колебаний электрического или механического резонансного контура при изменении угла наклона маятника. Основными элементами такого датчика являются инерционная масса, постоянный магнит и струнный преобразователь магнитоэлектрического типа.

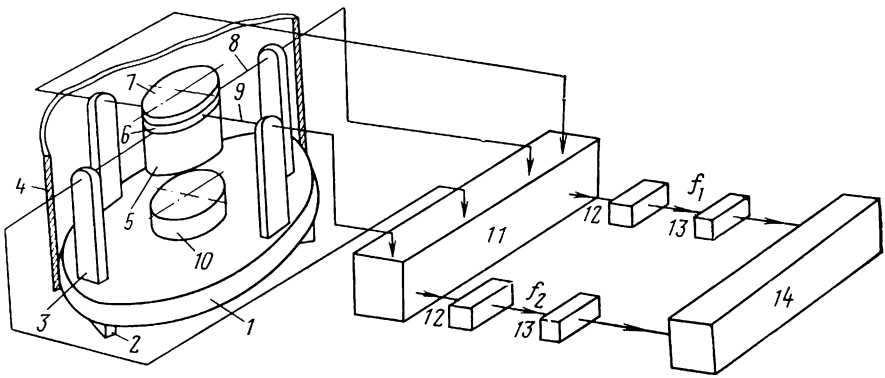


Рис. 55. Маятниковый датчик со струнным преобразователем

На керамическом основании *1* размещены четыре накладки *3* из изолирующего материала, с помощью которых закреплены в натянутом состоянии две струны *8* и *9* из вольфрама. В центре пересечения струн прикреплена инерционная масса, состоящая из стальной накладки *7*, медной накладки *6* и груза *5* из магнитотвердого материала. Струны зажаты между накладкой *7* и грузом *5*. В основании *1* закреплен постоянный магнит *10*. Прибор имеет три опорные точки *2* и накрыт стальным кожухом *4* (магнитным экраном).

Цилиндрические магниты *5* и *10* намагничены в направлении продольных осей цилиндров и расположены так, что одноименные полюса магнитов находятся напротив друг друга. При указанном расположении магнитов и их полюсов между магнитными цилиндрами возникает отталкивающая сила, которая поддерживает инерционную массу в определенном положении.

Взаимной юстировкой магниты *5* и *10* устанавливают таким образом, чтобы между ними образовался воздушный зазор. Медная накладка *6* осуществляет демпфирование колебаний инерционной массы (за счет взаимодействия магнитного поля с вихревыми токами в накладке).

В зависимости от выбранной плоскости, в которой осуществляется установка горизонта, в качестве токоподводов к инерционной массе используют струны *8*, а в качестве рабочих струн — струны *9* или наоборот.

Концы струн *8* и *9* датчика подключены к коммутатору *11*, который осуществляет подключение к электронным усилителям *12* с положительной обратной связью струны либо *9*, либо *8*.

На выходе усилителей *12* при этом получают частоты f_1 и f_2, которые после умножения в умножителях *13* поступают в блок *14*. В электронном блоке *14* вырабатывается умноженная разностная частота струны, пропорциональная углу отклонения датчика от горизонта.

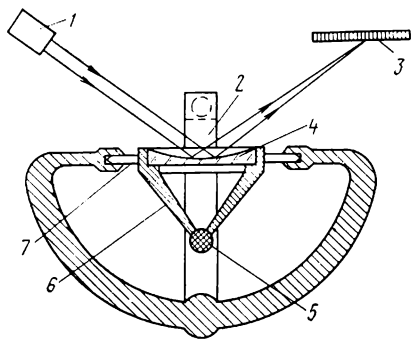


Рис. 56. Датчик углов наклона с фотоэлектрическим преобразователем

Маятниковый датчик с фотоэлектрическим преобразователем основан на измерении изменений светового потока при наклоне объекта с закрепленным на нем датчиком; на рис. 56 приведена его принципиальная схема. В таком датчике маятник выполнен в виде груза, закрепленного в оправе в специальном карданном подвесе, содержащем отражательное зеркало [61].

Вогнутое зеркало *4* (параболическое или сферическое) жестко укреплено в оправе *6*, которая с помощью шара *7* помещена в карданном подвесе *2*. Источник света *1* неподвижно закреплен на измеряемом объекте и направляет на зеркало *4* параллельный пучок света. Отраженный от зеркала свет попадает на фотоприемник *3*, плоскость которого совпадает с фокальной плоскостью зеркала *4*. Оправа зеркала *6* соединена с грузом *5*, карданный подвес *2* — с объектом измерения.

Если объект измерения наклонен, то благодаря карданному подвесу зеркало *4* сохраняет свое положение в пространстве неизменным. Однако при этом положение источника света *1*, связанного с объектом измерения, изменяется относительно зеркала, что приводит к перемещению точки фокусировки отраженного света в фокальной плоскости зеркала.

Позиционно-чувствительный фотодатчик *3* регистрирует величину смещения точки фокусировки пучка лучей.

Поскольку параллельные лучи света от источника света *1* направлены к оси зеркала *4* под некоторым углом, то при изменении положения объекта измерения в некоторых заданных угловых пределах фокальное пятно перемещается в круговом секторе с центром в главном фокусе зеркала *4*. Если элементы позиционно-чувствительного датчика *3* расположить вдоль радиуса этого

Таблица 3

Модель	Пределы измерений, ″	Цена деления,	Модель	Пределы измерений, ″	Цена деления, ″
«Теливел»	±480	20	«Калибр»	±480	20
	±100	4		±240	10
	±50	2		±100	4
	—	—		±50	2

сектора, то можно определять не только величину отклонения объекта, но и направление этого отклонения. Поэтому для датчика такой конструкции позиционно-чувствительный фотоэлектрический датчик целесообразно выполнять в виде мозаики из отдельных фотоприемников.

Груз *5*, прикрепленный к оправе *6*, понижает центр тяжести маятника с зеркалом и увеличивает момент силы, возвращающий зеркало *4* в положение равновесия, что в общем повышает чувствительность датчика.

Такой датчик может достаточно просто закрепляться на объекте измерения и дистанционно выполнять измерения по горизонтированию объекта.

Лучшие отечественные и зарубежные образцы маятниковых датчиков обеспечивают чувствительность около 1″ и точность не хуже 1″, малую зависимость показаний прибора от изменения температуры внешней среды. В табл. 3 приведены некоторые технические данные маятниковых уровней модели «Теливел» (Англия) и модели 129 (СССР) [13].

Предельная погрешность этих двух уровней не превышает цену деления.

Для повышения производительности измерений, снижения субъективных ошибок некоторые из выпускаемых в настоящее время новейших датчиков оснащают цифровыми индикаторами или цифропечатающими устройствами.

Глава III

ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 15. ТЕПЛОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При применении фотоэлектрических датчиков для автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений широко используют осветительные системы. Назначение осветительной системы состоит в формировании определенным образом ориентированного в пространстве светового пучка лучей. При помощи светового пучка задают опорные геодезические линии, геодезические плоскости, осуществляя вертикальное проектирование точек и т. д.

В зависимости от типа применяемого в осветителе источника излучения определяются во многом и оптическая схема формирующей излучение оптической системы, спектральный состав потока излучения, мощность светового потока, габариты осветителя и т. д.

Поэтому выбору типа источника излучения при создании контрольно-измерительной аппаратуры следует уделять очень большое внимание.

В практике инженерно-геодезических измерений в настоящее время нашли применение тепловые источники излучения, а также оптические квантовые генераторы и светодиоды.

Рассмотрим основные характеристики осветительных устройств и тепловых источников излучения. Качество осветительных устройств характеризуют силой I_0 света, излучаемого в нормальном направлении, коэффициентом τ пропускания и усиления m оптической системы, коэффициентом η_0 использования оптической системы, коэффициентом η_n использования светового потока, коэффициентом η полезного действия осветительной системы [124].

Для простейшей осветительной системы, состоящей из одной линзы (конденсора) и излучателя сила света I_0 в нормальном направлении определяется как [124]

$$I_0 = \tau B' \frac{\pi D_{\text{л}}^2}{4}, \tag{77}$$

где $B' = \left(\frac{n'}{n}\right)B$, B — яркость источника излучения; n, n' — показатели преломления оптических сред по обе стороны линзы.

Названные коэффициенты связаны между собой зависимостями

$$m = \tau \left(\frac{D_л}{d_и}\right)^2; \quad \eta_0 = \frac{\Phi_\omega}{\Phi_и}, \quad \eta = \frac{\Phi}{\Phi_\omega}, \tag{78}$$

где Φ_ω — световой поток в пределах угла охвата ω; $\Phi_и$ — полный световой поток, создаваемый источником излучения; Φ — световой поток, попадаемый на исследуемый облучаемый объект (на датчик)

$$\eta = \tau\eta_0\eta_n = \tau\frac{\Phi}{\Phi_и}; \quad m = \tau\frac{\eta}{\eta_0}\left(\frac{D_л}{du}\right)^2. \tag{79}$$

Конструкция осветительных систем может быть выполнена в виде различных систем: линзовых, зеркальных, зеркально-линзовых.

В связи с тем что излучающий элемент источника излучения не может быть точечным, световой поток на выходе излучателя отличается от параллельного пучка и имеет некоторую расходимость.

Для осветителей, выполненных по прожекторной схеме, расходимость выражается как

$$\alpha_р \approx \frac{d_и}{2f'}, \tag{80}$$

где $d_и$ — размер излучающей площадки источника; f' — фокусное расстояние отражателя.

Так как оптическая система, выполненная по прожекторной схеме, обычно имеет сферическую аберрацию, то действительный угол расходимости будет больше, чем вычисленный по формуле (80).

Использование зеркально-линзовых или линзовых осветительных систем снижает коэффициент полезного действия, однако в ряде случаев позволяет на выходе системы иметь пучок лучей, близкий к параллельному.

Теория и методика расчета таких систем в настоящее время хорошо разработаны [18] и позволяют создавать малогабаритные и эффективные осветители.

Точность работы фотоэлектрических датчиков во многом зависит от характера распределения световой энергии по сечению пучка лучей осветителя, т. е. от диаграммы направленности излучения. При разработке и конструировании осветительных устройств это обстоятельство необходимо учитывать и обеспечивать заданное распределение энергии.

Диаграмма направленности оптического излучения определяется как параметрами осветительной системы, так и параметрами излучателя.

Главными параметрами, характеризующими излучатели, являются: спектральный состав излучения, распределение силы излучения в пространстве, яркость излучающей площадки, форма

Типы лампы	Номинальные световые и электрические параметры				
	Напряжение, В	Мощность, Вт	Сила света в осевом направлении, кд	Световой поток, лм	Габаритная яркость, $\frac{кд}{м^2}$
ЖС11А	10	5	—	38	—
ЖС12А	10	10	—	100	—
С43	13	25	—	400	—
С51—С59	110,127, 220	25—60	—	180—576	—
А-34	6	0,6	—	2,5	—
СМ-36	3	0,6	—	2	—
СМ-33	24	4	—	32	—
СМ-34	6—8	1,6	—	9	—
СМ-30	28	4,8	—	37	—
СМ-39	28	2,0	—	5	—
СМ28-60	28	60	10 000	—	—
СМ28-80	28	60	—	—	12
СМ-39	28	2	—	5	—
ПЖ-25	24	220	—	—	30
ММ-31	6	6	—	60	—
СЦ-77	2,5	2	—	9	—
СЦ-118	2,4	2,6	—	28	—
СГ-2	6	7,5	—	88	—
СЦ-76	8	3,2	—	29	—
СЦ-3	6	15	—	188	—
СЦ-43	6	15	—	165	—
СЦ-2	6	30	—	405	—
ОП33-0,3	33	0,3	—	130	—
СЦ96	9	75	—	1300	—
СЦ-87	24	350	—	7000	—

и размер излучающего элемента, потребляемая мощность, напряжение питания, габариты, долговечность.

Тепловые излучатели работают на принципе превращения тепловой энергии в лучистую при нагревании излучающего элемента до высокой температуры (обычно вольфрама).

Отечественная промышленность выпускает широкий ассортимент ламп накаливания, которые с успехом могут быть применены в фотоэлектрических приборах геодезического назначения. Такие тепловые излучатели различаются не только по световым и электрическим параметрам, но и по конструкции нити накала лампы (прямоугольник, круг, конус и т. д.), наличию или отсутствию зеркальных покрытий, наносимых на внутреннюю поверхность стеклянного баллона, и т. д.

Совершенствование технологии получения вольфрамовых проволок особо малого диаметра (до 10 мкм) позволило в последние

Таблица 4

Основные габариты (наибольшие)				Срок службы, ч	Примечание
Диаметр, мм	Длина, мм	Тело накаливания			
		ширина, мм	высота, мм		
20	60	—	—	500	Двойное тело накала
20	60	—	—	500	То же
36	57	—	—	200	
45	74	—	—	500	
6,9	20	—	—	150	
4,3	15	—	—	100	
11	31	—	—	100	
11	30	—	—	100	
11	30	—	—	100	
6,9	20	—	—	100	
48	72	—	—	100	Имеет зеркальное покрытие
39	71	—	—	75	
6,9	20	—	—	100	
61	114	—	—	5	
20	33	0,4	3,8	300	
12	24	1,5	0,8	100	
18	33	3	—	5	
26	46	0,9	1,5	40	
12	24	2	0,6	50	
26	51	—	—	100	
21	65	—	—	100	
43	77	—	—	200	
26	90	0,6	3,5	150	
51	88	—	—	50	Зеркальная
92	147	—	—	30	Зеркальная

годы создать миниатюрные и сверхминиатюрные лампы накаливания, излучатели, устойчивые к вибрациям и перегрузкам. Срок службы ламп накаливания обычно не превышает 1000—2000 ч. Большую часть энергии вакуумные и газонаполненные лампы накаливания излучают в инфракрасную область спектра (60—80% от общей энергии приходится на диапазон волн от 0,85 до 2,5 мкм) и только 7—12% лучистой энергии приходится на видимую область спектра. Максимум излучения вакуумной лампы накаливания при температуре вольфрамовой нити $T = 2500°$ К находится в области $\lambda = 1{,}15$ мкм, а газонаполненных ламп — в области $\lambda \approx 1$ мкм при температуре нити $T = 2900°$ К [47].

В табл. 4 приведены данные некоторых ламп накаливания, наиболее часто используемых в фотоэлектрических устройствах [124], [89].

§ 16. ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ КАК ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Оптические квантовые генераторы (лазеры) находят все более широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе и в инженерной геодезии. Такому широкому внедрению во многие сферы человеческой деятельности лазеры обязаны своими особыми свойствами оптического излучения.

Высокая монохроматичность, когерентность и направленность их излучения позволят считать лазеры одним из наиболее эффективных и перспективных источников излучения.

В основе физики работы оптического квантового генератора лежат принципы индуцированного излучения когерентных электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне спектра. Сущность индуцированного излучения состоит в том, что возбужденные атомы или молекулы вещества под действием внешнего электромагнитного поля излучают энергию с той же частотой, фазой, поляризацией и в том же направлении, что и возбуждающее излучение.

Не останавливаясь подробно на рассмотрении вопросов физических явлений, происходящих в активной среде резонатора лазера, которые подробно изложены в специальной литературе [7], [43] и других источниках, укажем на основные особенности лазеров как источников излучения.

Излучение света лазером происходит практически на одной длине волны, вследствие чего такое излучение обладает высокой степенью монохроматичности. У газовых лазеров, например, ширина спектральной линии излучения $\Delta\lambda$ составляет примерно 10^{-6} Å (для одномодового режима работы), а степень монохроматичности соответствует величине $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-10}$.

Вследствие того что излучение лазера приходится на очень узкий интервал частот, оно обладает большой спектральной плотностью энергии излучения. Так, спектральная плотность излучения света Солнцем соответствует эффективной температуре источника излучения около 6000° К, а для лазерного излучения — примерно 10^{18}° К.

Монохроматичность выгодно отличает лазеры от тепловых и других источников излучения при практическом применении их в качестве источников света в оптико-электронных системах геодезического назначения. За счет применения узкополосных оптических фильтров удается существенно повысить помехозащищенность приемных устройств, добиться лучшего, с точки зрения коэффициента полезного деистия, согласования фотоприемного устройства с источником излучения. При высокоточных интерферометрических геодезических измерениях свойство монохроматичности излучения лазеров дает возможность рассчитывать скорость света в среде для фазового, а не группового показателя

преломления, что способствует повышению точности таких измерений.

В отличие от обычных источников излучение оптических квантовых генераторов обладает высокой степенью пространственной и временной когерентности. Под временем когерентности Δt понимают отношение $\Delta t = 1/\Delta\nu$, выражающее меру флуктуации частоты ν излучения на величину $\Delta\nu$ за определенный отрезок времени, пока эта флуктуация не сменится другой. Временная когерентность лазерного излучения во многом определяется конструкцией прибора и влиянием внешних факторов. Совершенствуя конструкцию, технологию производства и принимая дополнительные меры, можно добиться большой стабильности частоты излучения лазеров во времени.

От степени стабильности частоты излучения лазера во времени во многом зависит точность выполнения светодальномерных измерений, интерферометрических методов измерения линейных и угловых скоростей, деформаций, точность определения среднеинтегрального показателя преломления атмосферы и других геодезических измерений.

Пространственная когерентность определяется корреляцией фаз излучения, испускаемого из разных точек светящегося тела. В случае высокой степени пространственной когерентности фронт суммарной световой волны бесконечно близок к фронту плоской волны. Излучение ОКГ в силу его когерентности имеет фронт волны, близкий к плоскому или к сфере большого радиуса. По этой причине излучение лазера, обладая высокой направленностью светового пучка, дает возможность фокусировать его в пятно чрезвычайно малых размеров.

Тепловые, люминесцентные и другие источники излучения обладают очень низкой направленностью излучения, диаграмма направленности их лежит в пределах телесного угла от 2π до 4π. У некоторых типов газовых лазеров угол расходимости излучения может составлять величину $1-2'$ и в среднем для других типов газовых ОКГ не превышает $12-15'$. Высокая степень направленности излучения дает возможность при незначительных потерях за счет дополнительного сужения пучка лучей оптическими системами передавать энергию на большие расстояния и формировать в пространстве узконаправленный световой пучок. Последнее обстоятельство имеет огромное практическое значение в дальнейшем развитии методов и средств геодезических измерений.

Расходимость (степень направленности) лазерного излучения определяется различными факторами и в первую очередь формой отражающих поверхностей зеркал оптического резонатора и их взаимным расположением.

В отличие от обычных источников излучение большинства лазеров является поляризованным, это значит, что направления колебаний векторов поля излучения имеют преимущественный

характер. Это свойство лазеров с успехом может быть использовано при высокоточных геодезических измерениях, например для определения углов скручивания, модуляции светового потока по поляризации и т. д.

В настоящее время создано чрезвычайно большое разнообразие оптических квантовых генераторов, среди которых в первую очередь следует выделить газовые, твердотельные и полупроводниковые ОКГ.

Активным веществом в газовом лазере служит газ или смесь газов. Газовые лазеры, как правило, имеют непрерывный режим работы; мощность их излучения зависит от компонентов газовой смеси, рабочего объема, геометрии резонатора и лежит в пределах от долей мВт до нескольких десятков Вт (например, для аргоновых или лазеров на основе CO_2). Наиболее освоенными для практического применения следует считать газовые лазеры малой мощности и, в частности, лазеры на газовой смеси гелия и неона. Высокая монохроматичность, стабильность рабочей частоты, узконаправленность излучения и непрерывный режим работы обусловливают в настоящее время их преимущественное применение для инженерно-геодезических измерений.

Основные характеристики некоторых отечественных промышленных газовых лазеров приведены в табл. 5.

Рассмотрим ОКГ, нашедшие применение в инженерной геодезии (табл. 5).

Гелий неоновый ОКГ ЛГ-55 является малогабаритным прибором, обладает достаточной мощностью излучения, сравнительно небольшим потреблением энергии, долговечностью активного элемента и зеркал резонатора, работает в широком диапазоне температур окружающей среды.

Лазер ЛГ-56 — модификация прибора ЛГ-55 и отличается от него несколько улучшенными эксплуатационными параметрами. Он более устойчив к изменениям температуры окружающей среды, к запыленности и влажности.

Лазер ОКГ-11 по своим параметрам близок к ЛГ-55, хотя конструктивно выполнен иначе; он также может быть успешно применен при решении ряда инженерно-геодезических задач, на его основе выпущена опытная партия лазерных визиров.

В стационарных контрольно-измерительных установках для целей инженерной геодезии с успехом может быть применен лазер ОКГ-12. Он имеет значительную мощность излучения, повышенную прочность корпуса, устойчив к вибрациям и к перепадам температуры окружающей среды. Такой лазер выпускается промышленностью в двух модификациях — с излучением круглой формы по сечению луча и с эллиптической формой поперечного сечения луча.

Высокими конструктивными показателями и надежностью в работе отличается лазер ЛГ-65. Он рассчитан на работу в полевых условиях при температурах от —40 до +70° С, обладает

Таблица 5

Тип прибора	Длина волны, мкм	Режим генерации	Длительность импульса излучения, мкс	Частота повторения импульсов, кГц	Мощность излучения		Диаметр или поперечные размеры луча, мм	Угол расходимости пучка, угловые минуты	Гарантируемая долговечность активного элемента, ч	Габаритные размеры, мм
					в многомодовом режиме	в одномодовом режиме, мВт				
ОКГ-11	0,6328	Непрерывный	—	—	2 мВт	1	1,5	10	500	550×400×300
ОКГ-12	0,6328	То же	—	—	10 мВт	—	3×10	10×40	500	1160×120
ОКГ-12-1	0,6328	»	—	—	10 мВт	—	4	10	500	1160×120
ОКГ-13	0,6328	»	—	—	0,4 мВт	0,1	1,3	7	500	262×46
ОКГ-15	10,6	»	—	—	10 Вт	0,1	3	40	500	640×195×180
ОКГ-16	0,6328	»	—	—	—	—	1	7	500	180×46
ЛГ-36	0,6328	»	—	—	40 мВт	20	4	5	750	1530×290×300
ЛГ-36А	0,6328	»	—	—	80 мВт	40	5	5	500	1880×290×300
ЛГ-38	0,6328	»	—	—	—	50	2,2	1,8	750	2000×320×290
ЛГ-55	0,6328	»	—	—	2 мВт	1	2	5	500	360×70×60
ЛГ-56	0,6328	»	—	—	2 »	—		10	500	350×58×58
ЛГ-65	1,15	»	—	—	20 »	—	6	15	300	1110×150×120
ЛГ-75	0,6328	»	—	—	25 »	—	5	10	500	1080×109×112
ЛГ-75А	3,39	»	—	—	20 »	—	6	10	500	1080×109×112
ЛГ-126	0,6328; 1,15; 3,39	»	—	—	10 » На каждой длине волны	—		10	750	1150×126×146
ЛГ-169	0,6328	»	—	—	20 мВт	—	4	15	300	700×130×115
ЛГ-149*	0,6329914	»	—	—	—	0,5		3		820×350×170
ЛГ-159**	0,6328	»	—	—	—	10	5	2		1900×230×190
ЛГ-52-3	0,6328	»	—	—	—	2	0,6	6		

* Одночастотный высокостабильный лазер; нестабильность частоты излучения за 8 ч работы не более $5 \cdot 10^{-9}$; воспроизводимость частоты излучения $4 \cdot 10^{-8}$; в приборе предусмотрена возможность перестройки частоты на ±250 мГц.

** Одночастоный стабильный газовый лазер с повышенной мощностью излучения; нестабильность частоты излучения за 8 ч работы не более $1 \cdot 10^{-8}$.

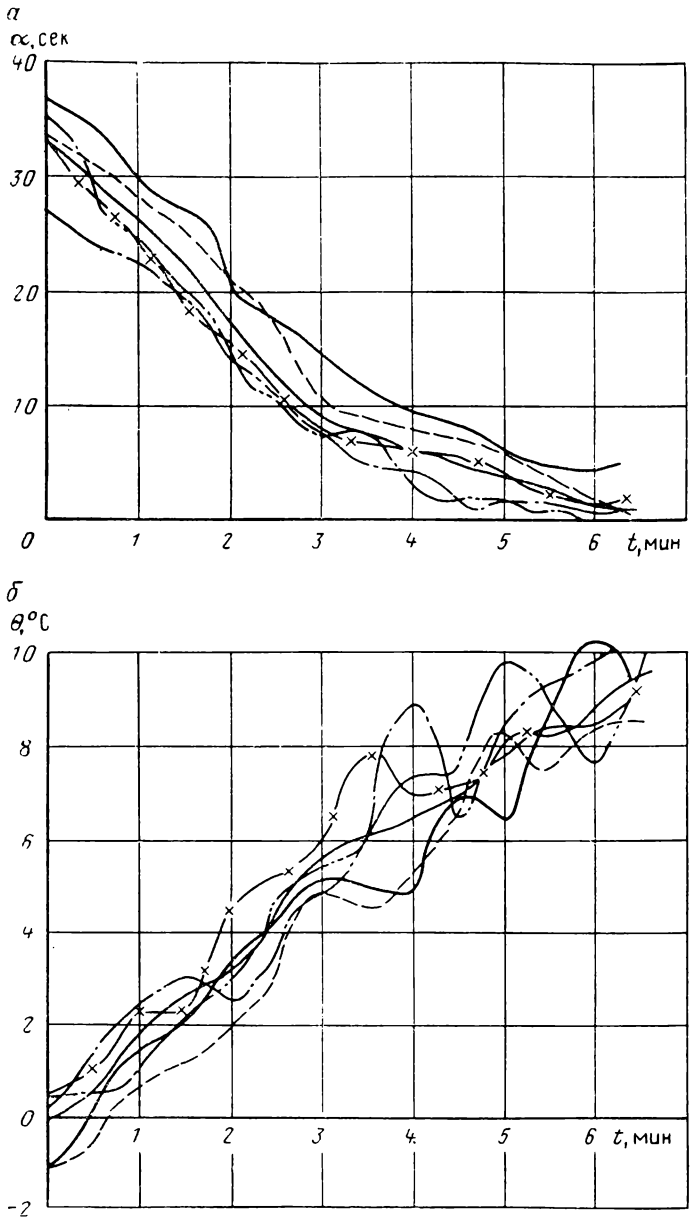


Рис. 57. Изменение углов наклона луча лазера ОКГ-11

повышенной стойкостью к перегрузкам (до 10 g) и вибрационной стойкостью, имеет надежную защиту от запыленности.

Для малогабаритных полуавтоматических и автоматических лазерных приборов геодезического назначения в качестве источника излучения нашел применение лазер ОКГ-13. Малая масса, незначительная потребляемая мощность, большая долговечность активного элемента, хорошая устойчивость к перепаду внешних температур позволяют считать его одним из наиболее удачных

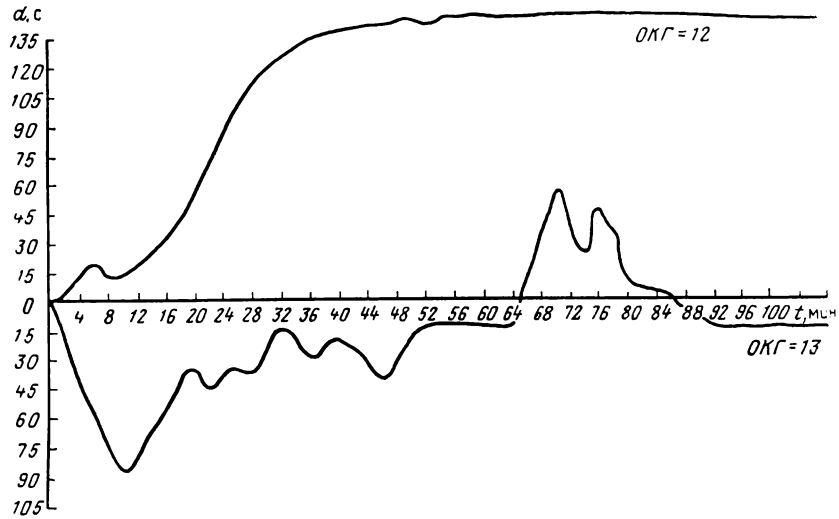


Рис. 58. Угловое смещение луча лазеров во времени

геодезических лазеров. Высокими эксплуатационными характеристиками обладает лазер ЛГ-52-3, работающий в одномодовом режиме.

Но большинство газовых гелий-неоновых лазеров как источников излучения кроме достоинств имеют и недостаток — угловую нестабильность направления распространения пучка лучей во времени. Она может явиться одним из источников ошибок в геодезических измерениях. Причиной нестабильности направления луча ОКГ, как показали исследования [28], является изменение температуры лазера.

Включенный прибор нагревается из-за выделения тепла спиралью подогревного катода газоразрядной трубки и от окружающей среды, если он был перенесен из помещения на открытую площадку с более высокой температурой, поэтому происходит тепловое расширение, а следовательно, и деформация несущей конструкции лазера, которые в свою очередь изменяют геометрию резонатора. Такой процесс деформаций для разных типов лазеров может занимать различное время и определяется временем установления теплового баланса. Так, для лазера ОКГ-11 с телеско-

пической трубой визира ЛВ-2 время установления теплового баланса достигает 10—20 мин, в течение которых луч лазера (после выхода из коллиматора) изменяет свое направление в вертикальной плоскости до 30—60″.

На рис. 57 приведены графики изменений угла наклона луча лазера ОКГ-11 с телескопической оптической системой: с момента включения (рис. 57, *а*) и зависимости температуры

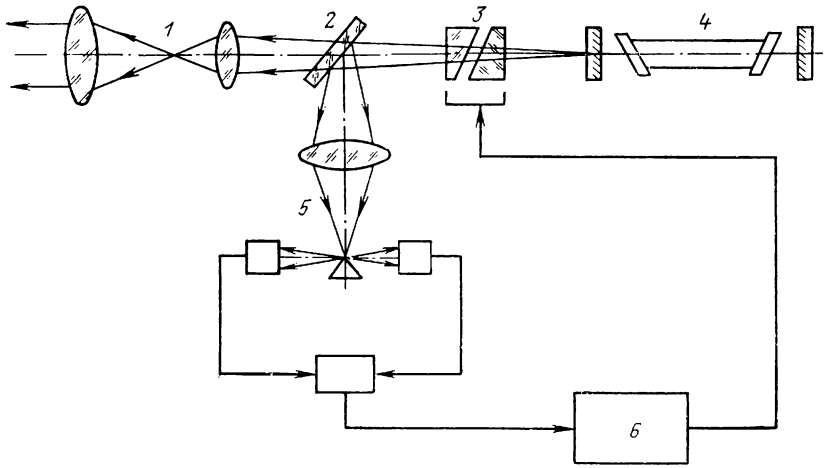


Рис. 59. Схема устройства для угловой стабилизации луча

нагрева прибора от времени (рис. 57, *б*) для пяти серий наблюдений [28].

При исследовании отсчеты снимались через каждые 30 с в течение первых 10 мин и через 1 мин в последующие 10 мин. Температура корпуса прибора и окружающей среды на расстоянии 2 м от прибора измерялись термопарами с точностью 0,1° С. За время эксперимента изменение температуры окружающей среды не превышало 1,5° С.

Результаты экспериментальных исследований*, выполненных в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии с помощью высокоточных оптико-электронных угломерных устройств, представлены на рис. 58. Из графика видно, что для лазера ОКГ-13 время установления окончательного теплового баланса может достигать одного часа и более и луч лазера за указанный промежуток времени изменит направление до 40″, для лазера ОКГ-12 это время составляет около 40 мин при изменении направления до 150″.

Использование лазеров с холодными катодами (типа ЛГ-52) в значительной степени позволяет повысить стабильность про-

* Исследования выполнялись В. К. Осиповым.

странственного положения лазерного луча и снизить угловые флуктуации до 5—10″*.

Поскольку при выполнении инженерно-геодезических работ лазер, как правило, применяют совместно с коллимирующей телескопической системой, которая в число крат увеличения трубы уменьшает угловой дрейф луча, то при измерениях пониженной точности можно работать с лазером, начиная с момента его включения.

Однако при выполнении высокоточных работ с использованием лазеров с подогревными катодами измерения необходимо начинать после прогрева лазера и периодически контролировать положение луча.

Указанные неудобства можно преодолеть, если в лазерных приборах создавать устройства автоматической коррекции углового положения луча. Возможная для реализации блок-схема такого устройства показана на рис. 59.

На выходе резонатора лазера *4* светоделительной пластиной *2* отбирают часть энергии излучения и направляют ее на угломерный датчик *5*, управляющий работой следящей системы *6* с сервоприводом оптико-механических конденсаторов *3* в виде двух вращающихся с одинаковой угловой скоростью навстречу друг другу клиньев.

При заданной стабильности направления луча в пространстве 0,5″ с учетом увеличения телескопической оптической коллимирующей системы *1* в $\Gamma^{\times}$ требуемая точность $\delta\varphi$ отслеживания углов ухода луча на выходе из резонатора составит $0{,}5'' \cdot \Gamma^{\times}$. При средних значениях $\Gamma^{\times} = 20\delta\varphi = 20 \cdot 0{,}5 = 10''$. Такую точность легко можно обеспечить современными угломерными следящими системами. Для уменьшения потерь световой энергии на компенсаторе клинья последнего следует просветлять на длину волны излучения лазера.

Оптические квантовые генераторы уже в настоящее время нашли широкое применение в качестве источников излучения при выполнении инженерно-геодезических измерений — при створных измерениях, измерениях расстояний, контроле прямолинейности, при наблюдении за смещениями, деформациями и осадками сооружений и их отдельных конструктивных элементов, высокоточном нивелировании и вертикальном проектировании.

---

* Исследования выполнялись В. К. Осиповым.

Глава IV

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОЙ ЛИНИИ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

§ 17. ЗАДАНИЕ ОПОРНОЙ ЛИНИИ СКОЛЛИМИРОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

В последние годы в СССР и за рубежом проводятся интенсивные научные разработки по созданию целого ряда полуавтоматических и автоматических оптико-электронных приборов геодезического назначения. Точность, производительность и степень автоматизации измерений при использовании оптического луча в качестве опорной линии во многом зависит от способа задания таким лучом референтного направления.

Под способом задания оптическим лучом опорного направления следует понимать совокупность методов и устройств, обеспечивающих строгое проектное направление распространения светового луча и позволяющих при помощи датчиков осуществлять по параметрам луча центрирование объекта относительно оптической оси луча.

Наиболее просто опорная линия оптическим лучом задается сколлимированным потоком излучения лазера. В качестве фотоэлектрических датчиков при данном способе используют различные амплитудные анализаторы — светоделительные призмы с одним или несколькими фотоприемниками, растровые, мозаичные структуры, сканирующие устройства и др. С использованием газовых оптических квантовых генераторов для автоматизации геодезических измерений появляется необходимость проведения исследований по согласованию параметров фотоэлектрического устройства с параметрами ОКГ [36].

Действие оптической системы на когерентный пучок лучей лазера зависит от оптических свойств системы, а также от свойств самого пучка.

Лазерный пучок лучей не является ни гомоцентрическим, ни пучком параллельных лучей. В общем случае энергия излучения лазера с резонатором, образованным двумя сферическими или одним плоским и одним сферическим зеркалами, распространяется в пространстве по касательной к кривым, образующим каустику, и структура пучка определяется в основном геометрией резонатора, т. е. кривизной зеркал и расстоянием между ними [43].

Однако для большинства инженерных расчетов излучение ОКГ можно принять распространяющимся с некоторым постоянным

углом расходимости и характеризовать его мощностью излучения, диаметром светового пучка на выходе ОКГ, угловой расходимостью и функцией распределения энергии лазера внутри телесного угла.

Чувствительность фотоэлектрического устройства связана как с энергетическими характеристиками оптической системы, так и ее геометрическими параметрами. Так, на выбор оптики фотоэлектрического устройства, используемого в качестве референтной опорной прямой излучения ОКГ, существенное влияние оказывает увеличение передающего телескопа.

Пренебрегая расходимостью излучения из-за рассеяния на трассе распространения, найдем

$$D_{\text{п}} = D_{\text{в}} + \gamma \frac{d}{D_{\text{в}}} l, \tag{81}$$

где $D_{\text{п}}$, d — характерный диаметр светового пучка ОКГ в плоскости входного зрачка приемной системы и на выходе соответственно; $D_{\text{с}}$ — диаметр выходного зрачка передающего телескопа; γ — угловая расходимость излучения ОКГ; l — расстояние между излучателем и приемником.

Увеличение передающего телескопа при этом должно быть $\Gamma^{\times} = D_{\text{в}}/d$.

Можно показать, что функция $D_{\text{п}} = f(D_{\text{в}})$, записанная в виде выражения (81), при сохранении $d = \text{const}$ принимает наименьшее значение при $D_{\text{в}} = \sqrt{\gamma d l}$. Поэтому для каждого конкретного расстояния l между передатчиками и приемниками с точки зрения максимальной концентрации энергии излучения ОКГ при работе в параллельных пучках и минимальных размерах входного зрачка приемной оптической системы, оптимальное увеличение передающего телескопа соответствует величине

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\gamma d l}}{d}. \tag{82}$$

При выполнении геодезических измерений иногда наблюдаются значительные поступательные смещения оптических осей передающего и приемного устройств. Если приемное устройство имеет входной зрачок круглой формы (например, содержит диафрагму, собирающую линзу и т. д.), то легко установить энергетическую связь между параметрами передающего и приемного устройств для указанных случаев.

На рис. 60 схематически изображены передающее *I* и приемное *II* устройства, удаленные друг от друга на расстояние l, причем оптическая ось приемного устройства параллельна оптической оси передающего устройства, но смещена относительно ее в одной плоскости на величину C.

На рис. 61 показано сечение потока излучения ОКГ плоскостью, совпадающей с плоскостью входного зрачка приемного устройства. Начало прямоугольных координат помещено в центре сечения потока излучения ОКГ. Количество энергии излучения

ОКГ, приходящей в плоскости анализатора изображения приемного оптического устройства, выразится соотношением

$$P_a = 2\tau_1' \iint\limits_S P_i\left(\frac{r_{\text{п}_i}}{r_{\text{п}}}\right) r_{\text{п}_i}\, dr_{\text{п}_i}\, d\varphi_i, \qquad (83)$$

где τ_1' — коэффициент пропускания оптики приемного устройства; S — окружность радиуса r_1, центр которой сдвинут на расстояние

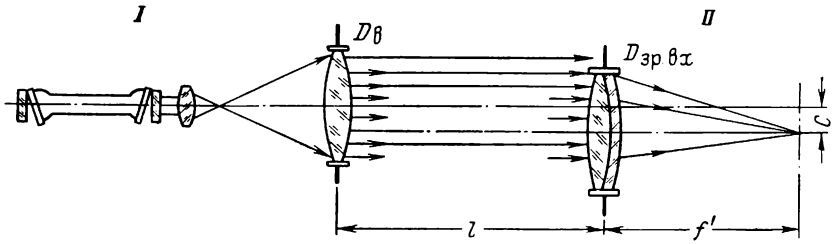


Рис. 60. Схема взаимного расположения передающего и приемного устройства

C; $P_i(r_{\text{п}i}/r_{\text{п}})$ — функция распределения энергии излучения ОКГ по сечению вдоль радиуса; r_1 — радиус входного зрачка приемного устройства; $r_{\text{п}i}$ — текущий радиус пучка излучения ОКГ; $r_{\text{п}}$ — характерный радиус сечения пучка излучения ОКГ.

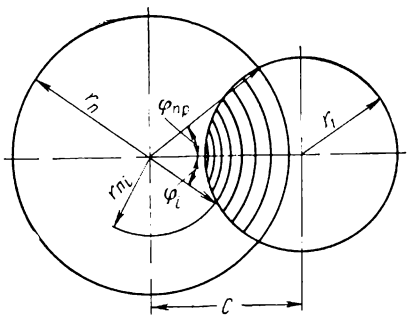


Рис. 61. Расположение луча ОКГ в плоскости входного зрачка

Если считать, что распределение энергии излучения ОКГ внутри телесного угла подчиняется закону нормального распределения [48], то

$$P_i\left(\frac{r_{\text{п}_i}}{r_{\text{п}}}\right) = C_{\text{р}} e^{-\left(\frac{r_{\text{п}_i}}{r_{\text{п}}}\right)^2}, \qquad (84)$$

где $C_{\text{р}}$ — коэффициент, величина которого определяется типом и режимом работы используемого лазера.

Для определения коэффициента $C_{\text{р}}$ энергию излучения ОКГ $P_{\text{л}}$ выразим через $P_{\text{л}}(r_{\text{п}i}/r_{\text{п}})$. Приняв во внимание потери в передающем телескопе и на трассе распространения излучения, получим

$$P_{\text{л}} = \frac{\int\limits_0^{2\pi} d\varphi \int\limits_0^{\infty} C_{\text{р}} e r_{\text{п}_i} e^{-\left(\frac{r_{\text{п}_i}}{r_{\text{п}}}\right)^2} dr_{\text{п}_i}}{\tau_1'' \tau_{\text{атм}}^{l}}. \qquad (85)$$

С учетом (85) находим коэффициент

$$C_{\text{р}} = \frac{P_{\text{л}}\tau_1''\tau_{\text{атм}}}{\pi r_{\text{п}}^2}. \tag{86}$$

Подставляя $C_{\text{р}}$ в (84), получим

$$P_i\left(\frac{r_{\text{п}i}}{r_{\text{п}}}\right) = \frac{P_{\text{л}}\tau_1''\tau_{\text{атм}}^{l} e^{-\left(\frac{r_{\text{п}i}}{r_{\text{п}}}\right)^2}}{\pi r_{\text{п}}^2}. \tag{87}$$

С учетом (87) выражение (83) для энергии излучения ОКГ, приходящей в плоскость анализатора изображения приемного оптического устройства, примет вид

$$P_{\text{а}} = 2\tau_1' \iint\limits_S \frac{P_{\text{л}}\tau_1''\tau_{\text{атм}}^{l} e^{-\left(\frac{r_{\text{п}i}}{r_{\text{п}}}\right)^2} r_{\text{п}i}\, dr_{\text{п}i}\, d\varphi_i}{\pi r_{\text{п}}^2} \tag{88}$$

или

$$P_{\text{а}} = \frac{2P_{\text{л}}\tau_{\text{атм}}^{l}\tau_1}{\pi r_{\text{п}}^2} \iint\limits_S e^{-\left(\frac{r_{\text{п}i}}{r_{\text{п}}}\right)^2} r_{\text{п}i}\, dr_{\text{п}i}\, d\varphi_i, \tag{89}$$

где τ — коэффициент пропускания оптики передающего и приемного устройств.

Каждый из параметров может быть найден путем решения уравнения (89) относительно данного параметра. Предельные значения параметров, входящих в (89), определяются при подстановке вместо P_e порогового значения энергии $P_{\text{ап}}$. Значения функций $e^{-\left(\frac{r_{\text{п}i}}{r_{\text{п}}}\right)^2}$ могут быть взяты из таблиц [16] для любых значений $r_{\text{п}i}$.

Приведенные энергетические соотношения позволяют решить обратную задачу: по известным величинам взаимного поступательного смещения передающего и приемного устройств осуществить выбор оптимальных параметров указанных устройств.

К недостаткам способа задания опорной линии сколлимированным потоком излучения следует отнести невысокую помехозащищенность приемного фотоэлектрического устройства от влияния фоновых засветок, невысокую точность при измерениях. Получение высокой точности измерений требует сложной схемы анализатора.

Оснащение передающего устройства модулятором света (оптико-механическим или электрооптическим) позволяет исключить указанные выше недостатки и в некоторых случаях не только упростить конструкцию приемной системы (фотоэлектрического датчика), но и добиться существенного повышения точности.

Модулировать электрический сигнал, снимаемый с фотодатчика, можно не только применением специальных модуляторов,

но и сканированием по определенно заданному закону лазерным лучом относительно проектного направления.

Такого сканирования луча по углу или поступательно можно достичь применением на передающем устройстве специальных сканаторов — оптико-механических, пьезоэлектрических, электрооптических.

В случае сканирования луча перед фотодетектором устанавливают щель, относительно которой с заданным гармоническим законом осуществляют смещение луча. Такие периодические перемещения энергетического центра луча относительно неподвижной диафрагмы позволяют выделить с фотодетектора переменный электрический сигнал, содержащий первую или вторую гармонические составляющие с изменяемой фазой. Подобные методы формирования проектного направления позволяют достичь высокой точности, например при определении смещений объекта.

Однако по мере увеличения расстояния между передающим и приемным устройствами точность отсчета падает из-за увеличения амплитуды сканирования луча в месте приема.

Одним из способов формирования прямолинейного направления является круговая развертка лазерного луча, т. е. вращение луча относительно проектной геодезической оси. Такой способ развертки позволяет в ряде случаев обеспечить равноточность измерений при изменении расстояния между излучателем и приемником и с успехом использовать высокоточные время-импульсные фотоэлектрические датчики линейных смещений.

Осуществление круговой развертки лазерного луча можно легко обеспечить вращающейся ромб-призмой или плоскопараллельной пластиной.

§ 18. ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОЙ ЛИНИИ ЗОННЫМИ ПЛАСТИНАМИ

При выполнении ряда геодезических измерений, например створных, нашел применение способ задания опорной линии с использованием лазера и зонных пластин.

Зонная пластина (рис. 62, *а*, *в*) представляет собою линзу Френеля и выполнена в виде экрана, содержащего прозрачные и непрозрачные зоны. При освещении зонной пластины от лазерного источника света на расстоянии q_i формируется яркое световое пятно (рис. 62, *в*, *г*), строго симметричное относительно прямой, соединяющей точечный источник света и ось симметрии пластины.

При перемещении δ_i зонной пластины в направлении, перпендикулярном к опорной рефрентной прямой, изображение источника света (лазерного луча) смещается в ту же сторону на величину a_i [126]

$$a_i = \frac{p_i + q_i}{p_i} \delta_i, \tag{90}$$

где p_i, q_i — соответственно расстояния от лазера до зонной пластины и от зонной пластины до регистрирующего устройства.

Наклон зонной пластины вдоль створа при условии сохранения перпендикулярности рабочей плоскости зонной пластины к направлению створа, а также ее развороты в пределах до $\pm 25°$

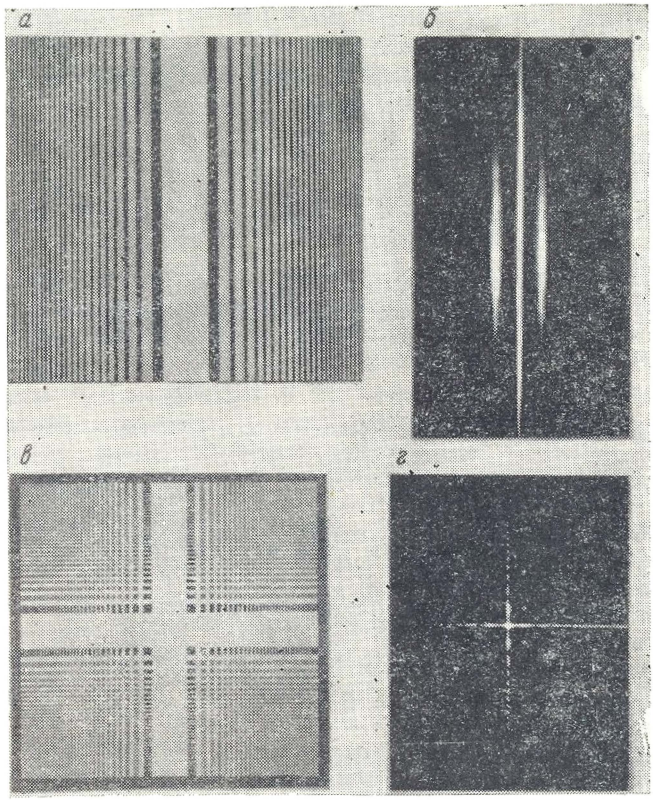


Рис. 62. Использование зонных пластин для формирования лазерного луча

вокруг вертикальной оси практически не влияют на положение оси симметрии изображения.

Такая некритичность к положению зонной пластины в створе значительно упрощает предварительную юстировку пластины, повышает производительность при измерениях.

Расчет геодезических зонных марок проводится по специальным формулам, определяющим положение краев прозрачных и непрозрачных зон Френеля

$$\xi_0 = \left(\frac{\lambda p_i q_i}{2L}\right)^{1/2} \cdot 0{,}450; \quad \xi_n = \left(\frac{\lambda p_i q_i}{2L}\right)^{1/2} \cdot (4n - 1{,}797)^{1/2}; \qquad (91)$$

$$\bar{\xi}_n = \left(\frac{\lambda p_i q_i}{2L}\right)^{1/2} \cdot (4n + 0{,}203)^{1/2}, \qquad (92)$$

где ξ_0, ξ_n, $\bar{\xi}_n$ — соответственно расстояния от оси симметрии зонной пластины до внутреннего края нулевой зоны, до внутреннего и внешних краев n прозрачных зон; n — номер прозрачных зон пластины; λ — длина световой волны; L — протяженность створа.

Указанные формулы позволяют рассчитать зонные пластины разных видов: одномерные, двумерные и с круговыми зонами. Ширина изображения в плоскости приемного устройства определяется из соотношения

$$D = \frac{\sqrt{5}\,\lambda q_i}{2\pi\bar{\xi}_n}. \qquad (93)$$

Параметр ξ_n берется из формул (91), (92) в зависимости от вида пластины.

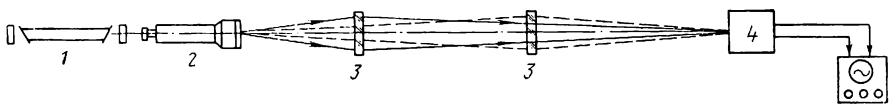


Рис. 63. Схема створных измерений с применением зонных пластин

При измерениях линейных смещений целесообразно применять одномерные зонные пластины, формирующие изображение источника света в конце створа в виде вертикальной узкой световой полосы.

Схема створных измерений с использованием зонных пластин показана на рис. 63.

В исходных и определяемых точках створа последовательно между излучателем *1*, коллиматором *2* и фоторегистратором *4* устанавливают марки *3* с зонными пластинами, с помощью которых лазерный пучок света формируется в предметную плоскость фотоэлектрического регистратора.

При створных измерениях фиксируют положение оси симметрии зонных пластин относительно опорной линии, определяемой источником света и базовой точкой регистрирующего устройства.

В качестве регистраторов используют регистраторы осциллографического типа, либо дискретного типа — с пересчетным устройством и цифровой индикацией.

В первом случае совмещение центра изображения марки с базовой точкой фотоэлектрического регистратора достигают выравниванием по амплитуде двух видеоимпульсов от регистратора на экране осциллографа при перемещении зонной пластины в направлении, перпендикулярном створу.

Во втором случае ось зонной пластины остается строго соосной с центром геодезического знака, а измерение несторности осуществляется на фотоэлектрическом регистраторе путем пересчета в дискретном виде величины смещения изображения

зонной пластины относительно базовой точки фотоэлектрического регистратора.

Технология изготовления зонных пластин в настоящее время хорошо разработана и состоит в нанесении на экран прозрачных зон относительно оси симметрии пластины фотомеханическим путем или гравированием на специальных подложках из стекла или оргстекла.

Приборы для створных измерений с использованием лазеров, зонных пластин и фотоэлектрических регистрирующих устройств объединяют общим названием лазерные интерференционные створофиксаторы.

§ 19. СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОЙ ЛИНИИ ТЕПЛОВЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Как уже отмечалось выше, наряду с лазерными источниками излучения в практике инженерно-геодезических измерений находят также применение и тепловые. Формирование в пространстве узконаправленного светового потока от тепловых излучателей сопряжено с определенными трудностями, обусловленными значительной расходимостью излучения от источника и, как следствие этого, необходимостью применения сложных оптических систем. Однако высокая надежность тепловых излучателей, достаточно высокая мощность излучения, небольшие габариты, дешевизна и невысокие питающие напряжения в ряде случаев позволяют отдать им предпочтение перед лазерными источниками.

При использовании тепловых излучателей для создания оптическим лучом опорной линии в принципе пригодны вышеописанные способы, однако наибольшее распространение получили два способа задания референтного направления — модулированным узконаправленным лучом и оптическим лучом, содержащим так называемую равносигнальную зону [74, 114, 115].

В первом случае у передающего устройства помещается модулятор (механический или электрооптический), осуществляющий модуляцию светового потока. Во втором случае в прожекторе устанавливают модулятор светового потока, создающий равносигнальную зону для фотоэлектрического приемного устройства, настроенного на соответствующие частоты модуляции. Модулятор расположен в фокальной плоскости и выполнен в виде двух разнесенных относительно друг другу дисков с вырезами (рис. 64). Прожектор имеет осветитель *1*, и его нить при помощи конденсатора *2* проектируется в фокальную плоскость объектива *3* прожектора. В фокальной плоскости объектива установлен модулятор, выполненный в виде диска *4* с двумя рядами вырезов *5* и *6* (с разным числом вырезов в каждом ряду). При вращении диска *4* из объектива прожектора выходят пучки модулированных лучей, частота каждого из которых соответствует числу вырезов в каждом ряде диска.

Начиная с некоторого расстояния от прожектора (порядка 100 фокусных расстояний от объектива), в пространстве создается четкая равносигнальная зона.

Для получения резкого и стабильного положения равносигнальной зоны необходимо устранить влияние биения линии раздела между двумя рядами вырезов на вращающемся модулирующем диске. Поэтому в фокальной плоскости объектива *1* (рис. 65) располагают ребро неподвижной разделительной призмы *2*, а модулятор *5*, состоящий из дисков с разным числом вырезов, выносят за фокальную плоскость и располагают на пути световых потоков, создаваемых нитью осветителя *6* при помощи зеркал *3* и конденсоров *4* [114].

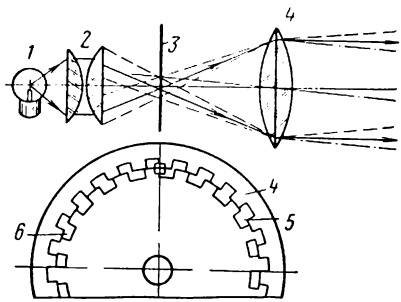


Рис. 64. Схема двухчастотного модулятора

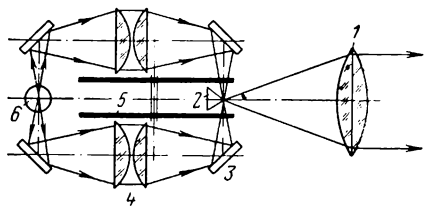


Рис. 65. Схема получения равносигнальной зоны разделительной призмой

При смещении входного зрачка приемного устройства относительно равносигнальной зоны оптического луча изменяется соотношение принимаемого объективом количества энергии, промодулированного разными частотами. В селекторных устройствах, расположенных после фотоэлектрических усилителей, в этом случае выделяется разностный сигнал той или другой частоты, который может характеризовать величину смещения контролируемой точки створа от референтной опорной линии.

Однако по мере удаления от передающего прожектора из-за расходимости излучения и влияния температурной турбулентности атмосферы увеличиваются и размеры равносигнальной зоны, что служит причиной уменьшения точности регистрации отклонений входного зрачка приемного устройства от оптической оси луча.

Несомненный интерес представляет возможность использования в качестве источников излучения в полуавтоматических и автоматических геодезических приборах арсенид-галлиевых светодиодов. Малые габариты излучателей, надежность, незначительная потребляемая мощность и удобство модуляции питающим током указывают на перспективность их применения в осветительных устройствах для целей автоматизации измерений [116].

§ 20. МЕТОДЫ РАЗВЕРТКИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ГЕОДЕЗИЧЕСКУЮ ПЛОСКОСТЬ

При выполнении ряда инженерно-геодезических измерений возникает необходимость в формировании лазерным лучом опорной геодезической плоскости.

Способы формирования опорной плоскости могут быть различными и определяются как характером, так и точностью выполняемых измерений.

Одним из известных способов создания опорной плоскости является развертка луча лазера с помощью зеркальной призмы (рис. 66) [27]. Зеркальная призма, имеющая m граней, вращается от электродвигателя со скоростью n об/мин. Частота сканирования луча определяется соотношением

$$F_{ск} = nm \qquad (94)$$

При значениях 8, n = = 9000 об/мин (для лазерного визира ЛВ-4) $F_{ск}$ составляет 1200 Гц. При использовании для коллимации излучения телескопической трубы с увеличением 30× расходимость луча на выходе устройства, формирующего плоскость, составляет 20—25″ (для лазеров с начальным углом расходимости 10′), а угол сканирования — примерно 50′.

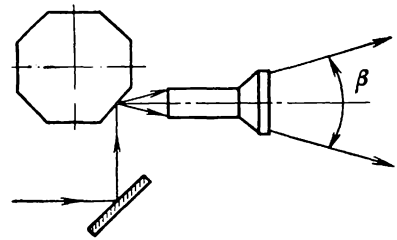


Рис. 66. Развертка лазерного луча в плоскость зеркальной призмой

Применение такого сканатора на практике требует высокой точности изготовления призмы, поскольку в противном случае из-за неточного ориентирования отражающих граней возможны биения луча в геодезической плоскости.

Формирование опорнои геодезической плоскости возможно осуществить также с применением цилиндрической оптики. Такой способ прост, надежен. Однако он требует хорошего расчетного согласования параметров лазерного луча, цилиндрической линзы и телескопической оптической коллимирующей системы и в своей основе связан со значительными потерями излучения в пространстве за счет расширения луча в одной плоскости.

Применение в качестве развертывающего устройства вращающейся пентапризмы позволяет осуществлять развертку луча практически с любой требуемой скоростью.

Одним из возможных вариантов развертки луча в плоскость является способ с применением вращающейся прямоугольной призмы (см. § 33).

Преобразование лазерного луча в плоскость может быть достигнуто и использованием неподвижных оптических элементов, например аксиконов или пустотелых стеклянных цилиндров. В последнем случае лазерный луч на стеклянный цилиндр направляется по нормали к образующей цилиндра и преобразуется в плоскость за счет многократного внутреннего отражения.

Глава V

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТВОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 21. АВТОМАТИЧЕСКИЕ И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА СТВОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Створные измерения находят широкое применение в инженерно-геодезической практике, при строительстве гидротехнических сооружений, наблюдении за устойчивостью глубинных опорных знаков, при монтаже и выверке технологического оборудования.

До последнего времени основным способом производства створных измерений являлся способ с использованием оптических труб и подвижной визирной марки. При этом измерения выполнялись преимущественно либо способом прямого визирования, либо способом последовательных створов.

В способе прямого визирования створ задается линией визирования теодолита, наведенного на неподвижную марку. В створе на выверяемом элементе конструкции устанавливают подвижную визирную марку, перемещение которой осуществляется помощником наблюдателя вручную.

При измерениях способом последовательных створов для уменьшения ошибок визирования общее расстояние между опорными пунктами створа делят на несколько равных частей. Последовательно перенося теодолит на место установленной в створе подвижной марки и ориентируясь по конечной неподвижной марке, выверяют всю линию.

При выполнении измерений указанными способами в процессе наблюдений участвуют два лица — наблюдатель, находящийся у инструмента, и помощник, осуществляющий перемещение подвижной марки и снятие отсчетов.

На точность створных измерений влияют не только качество зрительных труб, ошибки центрирования, визирования, перефокусировки, внешние условия наблюдения, но и субъективные систематические ошибки помощника наблюдателя, возникающие при работе с подвижной маркой [51].

Среди главных причин, вызывающих появление субъективных систематических ошибок, в первую очередь следует назвать ошибки, определяемые автономностью работы помощника, трудностями в обмене информацией между наблюдателем и помощником при большой протяженности створов, малой скоростью перемещения визирной цели марки. Выполняя многократно операцию введения марки в створ, помощник наблюдателя в некотором

роде достигает автоматизма, т. е. некоторого специфического состояния, при котором «угадывает» отсчет. Это обстоятельство приводит к тому, что субъективная систематическая ошибка может достигать половины величины ошибки визирования, тогда ошибки наблюдений мало изменяются с изменением расстояния [51]. Поэтому достичь высокой точности на створах большой протяженности достаточно трудно.

Радикальным средством повышения точности створных измерений является внедрение в процесс измерений средств автоматизации, например применение подвижной визирной марки с электроприводом и дистанционным управлением. Использование такой простой по конструкции полуавтоматической системы позволяет по существу исключить помощника из процесса измерении и тем самым значительно снизить ошибки створных измерений.

При таком способе сам наблюдатель, находящийся у зрительного инструмента, дистанционно управляет перемещениями марки в створе с пульта управления по кабельной линии связи или по радиоканалу и именно в тот момент останавливает марку, когда убежден в ее соответствующем положении в створе. Наблюдатель имеет возможность при работе с дистанционно управляемой маркой изменять направление перемещения визирной цели и плавно изменять скорость ее движения.

За счет механизации труда помощника не только возрастает точность измерения и производительность труда, но и качественно изменяется сам процесс измерения. Возможно автоматизировать и процесс отсчета местоположения марки в створе, совместив табло электронного дистанционного счетчика с пультом управления маркой.

Высокую точность, возможность автоматизации створных измерений и обработки результатов способны обеспечить оптико-электронные устройства, поэтому не случайно их разработке в последние годы в СССР и за рубежом уделяется большое внимание.

При создании таких устройств приходится решать две основные задачи: формирования в пространстве световым лучом опорной линии и определения на расстоянии положения ее оптической оси при помощи фотоэлектрического датчика с высокой точностью.

Весьма важно также учесть влияние внешних условий на стабильность пространственного положения опорной линии.

Для создания опорной линии при створных измерениях могут быть использованы как обычные тепловые излучатели, так и оптические квантовые генераторы и светодиоды.

Принципы формирования излучения при измерениях также могут существенно различаться (см. § 17).

Независимо от способа формирования опорной линии оптикоэлектронное устройство для створных измерений должно

содержать передающую систему и фотоэлектрический датчик, самоцентрирующийся над промежуточной измеряемой точкой и позволяющий определять положение последней в створе.

Процесс измерения при применении оптико-электронных устройств может быть автоматизирован частично или полностью.

Наиболее простым способом выполнения створных измерений с использованием фотоэлектрических датчиков является компенсационный полуавтоматический способ, при котором несторность точек определяется по величине смещения датчика в створе с помощью индикатора часового типа, а сам датчик используется как нуль-индикатор.

Возможна такая схема датчиков, при которой результирующий сигнал на их выходе представляет собой аналоговый или дискретный сигнал, пропорциональный по величине несторности. Индикация результатов измерения при этом осуществляется на стрелочном приборе или цифровом счетчике. В последнем случае выход цифрового счетчика может быть подключен ко входу вычислительного устройства и тем самым автоматизирован процесс обработки результатов измерения.

Среди многообразия оптико-электронных устройств для створных измерений особое место занимают устройства, которые объединяют в себе достоинства и метода створных измерений по способу подвижной марки, и высокую разрешающую способность оптико-электронных систем. К ним относятся фотоэлектрические насадки к геодезическим инструментам, позволяющие осуществлять визирование как на светящиеся цели, так и на обычные геодезические марки. Точное наведение геодезического инструмента на цель достигается за счет оснащения окулярной части зрительной трубы оптико-электронным датчиком, определяющим координаты изображения цели на сетке геодезического инструмента. При измерениях с использованием таких приборов местоположение марки в створе определяется не визуально, а по показаниям стрелочного прибора (гальванометра); результаты наблюдений получаются с высокой точностью и объективностью.

Среди известных способов автоматизации створных измерений следует указать на измерения с использованием индуктивных датчиков. Выверка створа при этом осуществляется посредством последовательного перемещения вдоль натянутой металлической струны датчика, содержащего самоцентрирующее устройство и блок электроники с регистратором в виде стрелочного прибора.

§ 22. ПОДВИЖНАЯ ВИЗИРНАЯ МАРКА С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Подвижная визирная марка с дистанционным управлением, созданная в МИИГАиК, состоит из двух блоков, соединенных между собой кабелем, — блока управления и непосредственно подвижной марки (рис. 67).

Блок управления включает в себя выпрямитель с трансформатором, полупроводниковый генератор для питания двухфазного асинхронного электродвигателя, приводящего в движение каретку с подвижной маркой. На лицевой панели блока управления расположены: тумблер включения и выключения, рукоятка управления перемещением марки, кнопка вызова оператора по телефонному каналу связи, кнопка для мгновенной остановки марки. Подключение телефонов к блоку управления и к марке

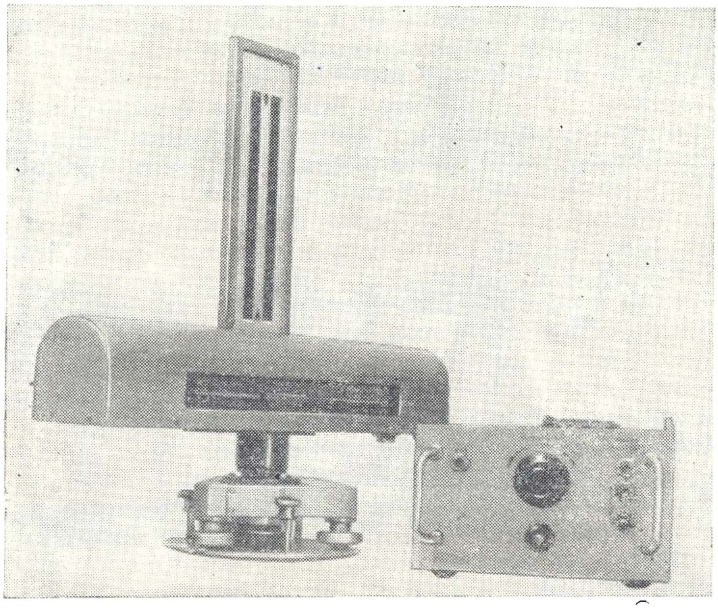


Рис. 67. Подвижная визирная марка

осуществляют через телефонные гнезда, вмонтированные в лицевую панель блока управления и в корпус марки. Изменение направления перемещения марки и скорости ее движения осуществляют поворотом рукоятки управления. Скорость движения марки пропорциональна углу поворота рукоятки управления.

Сама подвижная марка установлена на каретке, к которой прикреплены призма и плоская опора, изготовленные из фторопласта. Призма и плоская опора совместно с прижимной планкой удерживают марку на цилиндрических направляющих и предохраняют ее от опрокидывания при перемещениях. Каретка с установленной на ней маркой приводится в движение за счет использования в конструкции марки подвижного винта с гайкой. Вращение ходового винта осуществляется от двухфазного асинхронного электродвигателя ДИД-2ТА через редуктор.

Определение местоположения марки в створе производится по ноиусной линейке с ценой деления шкалы 0,05 мм.

Конструкция марки позволяет перемещать марку в створе в пределах ±100 мм с максимальной скоростью, достигающей 2 см/с. Прибор питается от сети промышленной частоты напряжением в 220 В.

Принципиальная электрическая схема блока управления дистанционно управляемой марки показана на рис. 68.

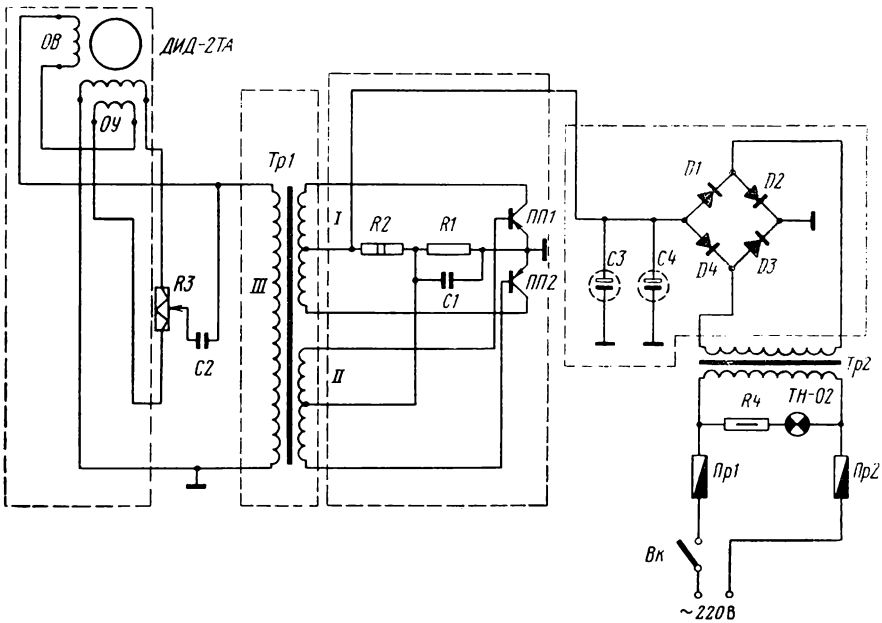


Рис. 68. Электрическая схема блока управления подвижной маркой

Генератор переменного напряжения 36 В 400 Гц выполнен на основе мультивибратора, собранного по трансформаторной схеме на двух транзисторах ПП1, ПП2 типа П217Г.

Рукоятка управления перемещениями марки кинематически связана с потенциометром *R3*, включенным в электрическую цепь, содержащую обмотки управления (ОУ) и обмотку возбуждения (ОВ) асинхронного электродвигателя.

Реверс вращения вала электродвигателя достигается изменением напряжения на обеих управляющих обмотках электродвигателя при помощи потенциометра.

Для измерений с дистанционно управляемой маркой оборудуют створ: на начальном и конечном пунктах створа устанавливают теодолит и неподвижную визирную марку. В промежуточной точке створа на специальной подставке устанавливают подвижную марку. Пульт управления размещают рядом с теодолитом на пункте наблюдения.

Включают пульт управления подвижной маркой и выполняют створные измерения. Для этого, наблюдая в теодолит, поворачивают рукоятку управления маркой и быстро выводят ее из створа. Затем, изменяя положение рукоятки в противоположном направлении, вновь вводят марку в створ. По мере приближения марки к створной плоскости вращением рукоятки плавно уменьшают скорость ее перемещения до малой величины и в момент прохождения марки через створную плоскость ее останавливают, нажимая кнопку «мгновенный стоп». После этого, не отпуская кнопки «мгновенный стоп», доворачивают рукоятку управления в исходное среднее положение и только тогда освобождают кнопку. Отсчет местоположения марки снимают по ниусной линейке.

В работе одновременно участвуют два человека: один проводит наблюдения, второй — снимает отсчеты.

Производственные испытания подвижной визирной марки показали, что схема управления обеспечивает надежную работу марки на расстоянии до нескольких сотен метров и высокую точность визирования. При производственных испытаниях проводились эксперименты по обнаружению субъективных систематических ошибок помощника наблюдателя. На участке створа в 220 м наблюдались 18 промежуточных точек сначала с помощью подвижной марки, визирную цель которой перемещал помощник, имеющий опыт работы на створных наблюдениях, затем с помощью дистанционно управляемой марки. Обработка результатов измерений показала, что точность наблюдений с дистанционно управляемой маркой выше, чем с подвижной. Как показал анализ, наибольшую часть в этих расхождениях составляют субъективные ошибки оператора в способе с ручной подвижной маркой [51].

Расхождения между уклонениями точек от створа, найденные двумя способами, возрастают с увеличением расстояния от инструмента до подвижной марки, достигая для наиболее удаленных точек 5,6 мм.

Опыт применения дистанционно управляемой подвижной визирной марки показал перспективность ее применения в высокоточных инженерно-геодезических работах на створах большой протяженности.

§ 23. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ОТСЧЕТОВ ПРИ СТВОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВИЖНОЙ МАРКИ

В ряде случаев, как уже рассматривалось, имеется возможность при выполнении створных измерений исключить из процесса наблюдений помощника наблюдателя, передав его функции автоматической измерительной системе.

Для решения указанной задачи описанная конструкция подвижной визирной марки должна быть дополнена блоком электронного дистанционного отсчета местоположения марки [35]. Блок

отсчета при выполнении створных измерений помещается на пункте наблюдений рядом с блоком управления. Наблюдатель с пункта наблюдений получает возможность не только управлять местоположением подвижной марки в створе, но и фиксировать отсчеты, снимая их с электронного табло блока отсчета. Для дистанционного определения местоположения марки в створе возможно применить аналоговую или дискретную систему отсчета.

Наиболее простым способом решения подобной задачи является оснащение подвижной марки потенциометрическим датчиком линейных смещений. Подвижной контакт датчика перемещается вместе с кареткой марки относительно каркаса линейного потенциометра, жестко закрепленного на направляющих каретки, и по изменению электрических параметров мостовой схемы, в которую включен датчик, судят о величине перемещения марки.

Однако получить высокую точность отсчета при такой аналоговой схеме не удается из-за нелинейности статической характеристики потенциометра с нагрузкой, из-за помех и затухания полезного сигнала в кабельной линии связи.

Дискретная система отсчета обладает большой помехоустойчивостью и точность отсчета при этом не зависит от внешних условий, длины и сопротивления соединительного кабеля.

Автоматизация отсчета местоположения марки в створе при дискретной системе отсчета может быть достигнута на принципах преобразования в кодовую последовательность импульсов измеряемого линейного перемещения каретки или углового (вращательного) перемещения ходового винта марки.

В первом случае отсчет с высокой точностью величины линейного перемещения каретки марки может быть выполнен с использованием фотоэлектрического датчика линейных смещений растрового типа.

Во втором случае, зная шаг резьбы ходового винта, линейное перемещение марки может быть определено по количеству оборотов ходового винта путем подсчета числа импульсов, вырабатываемых фотоэлектрическим датчиком «угол-код» или датчиками аналогичного назначения индуктивного или электроконтактного типа.

Сравнительный анализ, а также данные экспериментальных исследований указывают на целесообразность использования на практике для отсчета величины перемещения марки в створе и определения ее местоположения фотоэлектрических датчиков.

Конструктивно такой датчик может быть выполнен в виде обтюратора, жестко закрепленного на конце вала ходового винта марки (рис. 69).

Число щелей n в обтюраторе следует выбирать исходя из требуемой точности определения перемещений марки в створе и шага s ходового винта.

За один оборот ходового винта с датчика на предусилитель поступает n импульсов с ценой деления одного импульса s/n, мм.

Общее перемещение L марки в створе определяется числом импульсов $N = Ln/S$.

Для определения направления перемещения марки и отсчета ее местоположения в створе устройство счета числа импульсов должно представлять собой реверсивный счетчик импульсов.

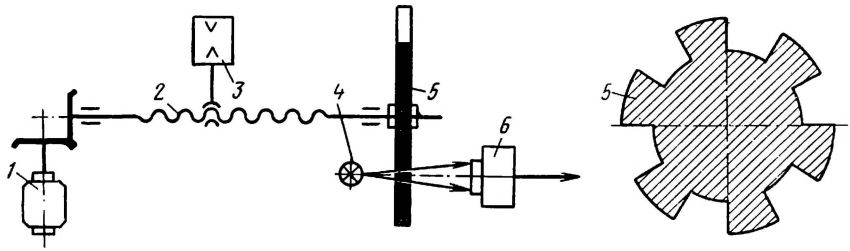


Рис. 69. Преобразователь угла поворота в число импульсов:
1 — электродвигатель, *2* — ходовой винт, *3* — марка, *4* — источник света, *5* — модулятор, *6* — фотоприемник

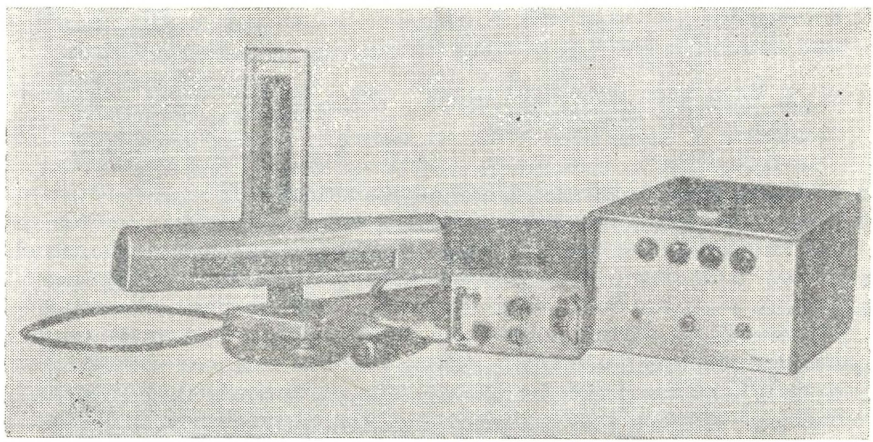


Рис. 70. Подвижная визирная марка с блоком дистанционного отсчета

Такой счетчик осуществляет сложение импульсов от датчики с ранее зафиксированным отсчетом или их вычитание в зависимости от направления перемещения марки в створе. Управление реверсом счета осуществляется синхронно с заданием направления перемещения марки поворотом рукоятки управления на пульте.

В МИИГАиК разработана и создана подвижная визирная марка с дистанционной системой отсчета ее местоположения в створе (рис. 70).

Принцип действия электронного блока дистанционного отсчета основан на последовательном счете числа импульсов,

вырабатываемых фотоэлектрическим преобразователем величины угла поворота ходового винта подвижной марки в число. Счет числа импульсов осуществляется электронным цифровым четырехдекадным реверсивным счетчиком, выполненным на декатронах.

Передача импульсов от марки к пункту наблюдения производится по той же кабельной линии связи, которая используется и для управления маркой.

Технические параметры электронного блока отсчета позволяют надежно и дистанционно определять положение марки

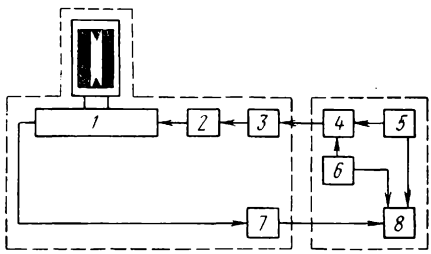


Рис. 71. Блок-схема подвижной марки с автоматическим отсчетом

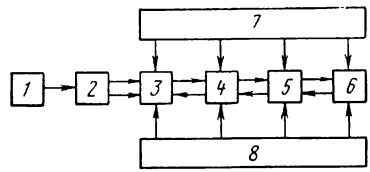


Рис. 72. Блок-схема числового реверсивного счетчика

в створе в диапазоне линейных перемещений 100 мм с точностью 0,1 мм. За один оборот ходового винта, имеющего шаг резьбы 1 мм, с фотоэлектрического преобразователя, содержащего обтюратор с десятью щелями, снимается 10 импульсов с ценой значения каждого импульса 0,1 мм.

Блок-схема подвижной визирной марки с дистанционной системой отсчета показана на рис. 71, она содержит каретку *1*, редуктор *2*, электродвигатель *3*, генератор *4*, блок питания *5*, рукоятку управления с кулачком и коммутирующим устройством *6*, преобразователь «угол-код» *7*, счетчик *8*.

Изменение направления перемещения марки, регулировка скорости ее перемещения в створе, а также управление реверсом счетчика импульсов осуществляется одной рукояткой, вынесенной на переднюю панель пульта управления. На валу рукоятки управления соосно с валом управляющего потенциометра укреплено коммутирующее электроконтактное устройство 6.

При повороте рукоятки управления в ту или иную сторону кулачком коммутирующего устройства замыкают или размыкают при помощи микровыключателей соответствующие управляющие обмотки реле счетчика, благодаря чему и достигается реверс счета импульсов.

Реверсивный счетчик содержит четыре счетные декады, каждая из которых выполнена на лампе 6Н1П и декатроне ОГ-4.

Декатроны одновременно со счетом импульсов осуществляют и индикацию результатов измерения.

Декатроны в схеме счетчика включены таким образом, что первая декада осуществляет счет числа импульсов с ценой значения 0,1 мм, а каждая последующая фиксирует десятки, сотни и тысячи импульсов, поступающих на первую декаду. Такое распределение импульсов при их счете позволяет определять по показаниям счетчика перемещение марки сразу в линейной мере в пределах от 0,1 мм до сотен мм.

Блок-схема типового реверсивного счетчика показана на рис. 72.

Для усиления импульсов, снимаемых с фотоэлектрического датчика *1*, формирования их фронтов перед входом первой счетной декады *3* в схему счетчика включен усилитель-ограничитель *2*, выполненный на транзисторах.

В зависимости от направления перемещения каретки марки импульсы с усилителя-ограничителя счетчика *2* через реле коммутирующего устройства *8* поступают на первый или второй входы первой счетной декады (на левую или правую половину лампы 6Н1П) и тем самым первая и каждая последующая *4*, *5*, *6* счетная декада осуществляют счет импульсов в прямом или обратном направлениях.

Электрические сигналы с соответствующих анодов лампы 6Н1П первой декады поступают на интегрирующие и дифференцирующие ячейки схемы запуска декатрона. Этим создается соответствующая временная последовательность подачи запускающих импульсов на подкатоды декатрона, т. е. определенный временной сдвиг между импульсами, поступающими на декатрон.

Так при движении каретки марки слева направо счетчик осуществляет прямой счет — суммирование импульсов. Импульсы от датчика поступают на левую половину лампы 6Н1П первой декады и после снятия с анода лампы дифференцируются и поступают на первый подкатод декатрона, а также интегрируются и подаются на второй подкатод декатрона, чем достигается перемещение разряда в нем по часовой стрелке. При перемещении каретки в противоположном направлении счетные импульсы с датчика подаются на правую половину лампы 6Н1П, по дифференцированный сигнал поступает на второй подкатод декатрона, а интегрированный сигнал — на первый подкатод декатрона. Такая последовательность импульсов обеспечивает перемещение разряда в декатроне против часовой стрелки, что равносильно вычитанию импульсов из ранее записанного на счетчике результата.

Декатроны типа ОГ-4 имеют десять катодов. С приходом каждого импульса разряд в декатроне перемещается с одного катода на другой и с приходом десятого импульса перемещается на нулевой подкатод, а на выходной нагрузке декатрона появляется импульс, дающий информацию о том, что сосчитано

10 входных импульсов. После этого счет числа импульсов в данной декаде начинается сначала, а каждый десятый импульс переходит на последующую декаду.

Установка показаний счетчика на нуль осуществляется устройством 7 (см. рис. 72) нажатием кнопки на пульте управления маркой. При этом разряды всех декатронов одновременно устанавливаются на нулевые подкатоды.

Методика выполнения створных измерений с использованием дистанционно управляемой марки и системой дистанционного отсчета достаточно проста. Выполнив первое введение марки в створ и определив место ее нуля, наблюдатель нажимает на пульте управления кнопку сброса показаний счетчика и устанавливает нулевой отсчет.

При всех последующих введениях марки в створ на табло счетчика автоматически фиксируется в цифровой форме ошибка нестворности, вычисленная по отношению к первому отсчету. При этом не возникает необходимости в приведении показаний счетчика к нулю при каждом последующем введении марки в створ, так как эту операцию автоматически выполняет реверсивный счетчик.

Метод створных измерений с использованием дистанционно управляемой по кабельной линии связи маркой обладает тем недостатком, что при работе на протяженных створах или в полевых условиях возникают трудности при прокладке кабеля. Исключить необходимость прокладки кабеля и уменьшить массу аппаратуры можно, если для управления маркой применить многокомандное приемо-передающее устройство.

На пункте наблюдения размещается передатчик, несущая частота которого может модулироваться одной из четырех различных частот. Изменение частоты модуляции достигается нажатием одной из четырех кнопок на корпусной панели передатчика. Подвижная марка оборудуется приемником, который настроен на частоту передатчика. Приемное устройство содержит: антенный вход, УВЧ, детектор, блок фильтров, УНЧ, релейный блок.

Модулирующий сигнал в приемнике после детектирования выделяется одним из четырех фильтров. Число фильтров соответствует числу командных частот. После выделения сигнала соответствующей частоты он усиливается и включает соответствующее реле. Таких реле четыре, они включают исполнительный механизм. Командное устройство обеспечивает выполнение следующих операций: движение марки влево; движение марки вправо; движение марки ускоренное; движение марки замедленное.

Мгновенная остановка марки осуществляется непосредственно при отпускании кнопок «движение влево» или «движение вправо». Отсчеты местоположения марки в створе при данном способе управления может записывать помощник, пользуясь ноиусной

линейкой марки, или они могут быть переданы на пункт наблюдения и зафиксированы автоматически.

Для автоматического получения информации о местоположении марки в створе на корпусе марки дополнительно устанавливается передатчик, который посылает импульсы через эфир на приемник, находящийся на пульте управления наблюдателя. Число импульсов определяет величину линейного смещения марки. Усиленные импульсы поступают на реверсивный электромеханический счетчик, осуществляющий их алгебраическое суммирование.

Реверс счета достигается нажатием кнопок на пульте управления. При нажатии кнопки «движение влево» происходит суммирование, при нажатии кнопки «движение вправо» — вычитание.

§ 24. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СТВОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Высокая разрешающая способность оптико-электронных устройств, возможность автоматизации процесса измерения и обработки результатов измерения определили ведущую роль фотоэлектрических устройств в применении к задачам автоматизации створных измерений.

Основным чувствительным элементом таких устройств является фотоэлектрический датчик линейных смещений.

В настоящее время известно большое число фотоэлектрических датчиков линейных смещений. предназначенных для отыскания энергетического центра оптического луча или центрирования объекта относительно оптической оси луча, задающего опорную линию при створных измерениях.

Среди таких датчиков, которые могут быть использованы для створных измерений, в первую очередь следует назвать фотоэлектрические датчики с амплитудными анализаторами, диссекторные датчики, датчики с фазочувствительными модулирующими растрами и другие.

В МИИГАиК создан высокоточный фотоэлектрический датчик для створных измерений дифференциального типа (рис. 73), основанный на амплитудном методе выделения информации и отличающийся от известных датчиков принципом обработки информации о положении оптической оси светового луча, задающего опорную линию. Такой датчик в комплекте створной аппаратуры может работать как с лазерным, так и с оптическим лучом, создаваемым любым другим источником излучения.

Функциональная схема датчика приведена на рис. 74.

Модулированный световой поток от осветителя, например лазера, светоделительным ножом *2* разделяется на два луча, каждый из которых воспринимается фотодиодами *1* и *3*. После усиления предварительными усилителями *4* и *5* электрические сигналы от фотоприемников подаются через разделительные емкости *6*, *7* на электронное устройство *8* выделения мгновенной

суммы и разности сигналов. Разность и сумма указанных сигналов усиливается электронными усилителями *9*, *10* и поступает на фазовый детектор *12*, выход которого нагружен на регистриру-

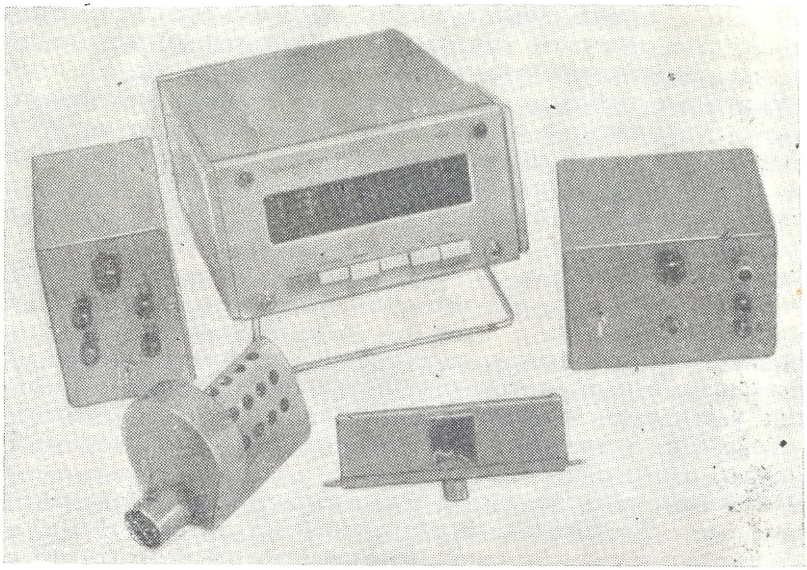


Рис. 73. Высокоточный датчик для створных измерений

ющий прибор *13*. Выход усилителя *10* суммы сигналов через устройство *11* автоматической регулировки усиления (АРУ) подключен ко входу усилителя *9* разности сигналов.

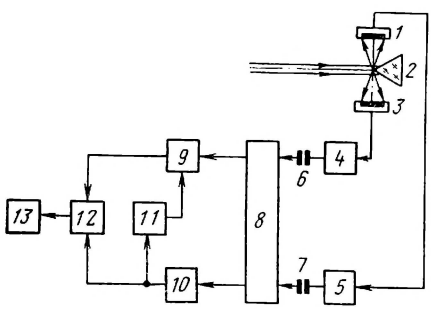


Рис. 74. Схема датчика со светоделительной призмой

Применение в схеме прибора устройства для выделения мгновенной суммы и разности сигналов от фотоприемников дает возможность выделить на фазовом детекторе электрический сигнал в виде постоянного тока, величина и знак которого определяют величину и направление смещения потока излучения с оптической оси прибора.

Введение в электронную схему прибора устройства АРУ позволяет исключить влияние на точность регистрации смещений изменение в широких пределах мощности излучателя, в том числе и из-за влияния метеоусловий.

Устройство для выделения мгновенной суммы или разности сигналов может быть выполнено или в виде восьмиполюсного резисторного моста, или на двух транзисторах.

Возможная для реализации схема устройства для выделения от фотоприемников мгновенной суммы и разности электрических сигналов — восьмиполюсный мост — показана на рис. 75.

На входы A и B восьмиполюсного моста с предусилителей электрический сигнал с первого фотоприемника подается в диагональ моста ae, а сигнал со второго фотоприемника — в диагональ cd. Все резисторы моста имеют одинаковые номиналы и с целью его уравновешивания тщательно подбираются.

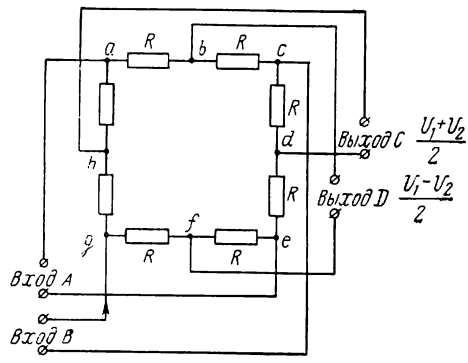


Рис. 75. Восьмиполюсный электрический мост

С выхода C восьмиполюсного моста снимается полусумма входных сигналов, с выхода D моста — полуразность, а фаза электрического сигнала полуразности совпадает или противоположна фазе сигнала полусуммы в зависимости от того, какой из двух электрических сигналов от каждого из фотоприемников больше по амплитуде в рассматриваемый момент времени.

Действительно, если ко входу A приложено напряжение U_1, а ко входу B — напряжение U_2, то разность потенциалов в диагоналях моста hd и bf выражается зависимостями:

для диагонали hd

$$U_{hd}=U_h-U_d=\frac{3}{4}(U_1+U_2)-\frac{1}{4}(U_1+U_2)=\frac{U_1+U_2}{2}; \quad (95)$$

для диагонали bf

$$U_{bf}=U_b-U_f=\frac{1}{4}(3U_1+U_2)-\frac{1}{4}(U_1+3U_2)=\frac{U_1-U_2}{2}. \quad (96)$$

Как следует из полученных выражений, на выходе C моста сохраняется постоянство сигнала независимо от соотношения величин U_1 и U_2, а на выходе D моста фаза сигнала меняется в зависимости от знака разности $(U_1 - U_2)$.

Схема выделения мгновенной суммы и разности сигналов может быть построена на двух транзисторах, выполняющих роль инверторов (рис. 76). На базы транзисторов $T1$ и $T2$ через переходные емкости $C1$ и $C2$ поступают синфазные переменные сигналы с фотоприемников $ФП1$ и $ФП2$. Сигналы с эмиттеров транзисторов $T1$ и $T2$ будут также синфазны по отношению

друг к другу и с переменного сопротивления *R10* снимается сумма этих сигналов. Сигнал на коллекторе транзистора *T2* будет в противофазе сигналу, снимаемому с эмиттера *T1* и при сложении их на переменном резисторе *R13* выделяется разность указанных сигналов.

При одинаковых параметрах фотоприемников резисторы *R3*, *R4*, *R7* и *R8* должны иметь одинаковые номиналы и транзисторы *T1* и *T2* — одинаковый коэффициент усиления. На практике же довольно трудно подобрать фотоприемники с одинаковой чувствительностью к световому потоку и равными напряжениями шумов. В этом случае тщательно подбираются номиналы *R7* и *R8* таким образом, чтобы сигналы, снимаемые с эмиттера и коллектора транзистора, были равны. Затем величинами резисторов *P3* и *P4* сигнал на эмиттере *T1* устанавливают равным сигналам, снимаемым с *T2*. Таким образом можно устранить вредное влияние неидентичности параметров приемников излучения.

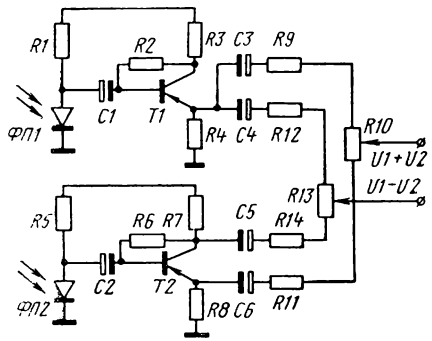


Рис. 76. Транзисторная схема выделения сигналов

Экспериментальные исследования такого датчика показали высокую точность определения смещений при створных измерениях с применением сколлимированного лазерного луча. Средняя квадратическая ошибка в определении местоположения энергетической оси лазерного луча составила 12 мкм в диапазоне смещений 5 мм.

Высокую разрешающую способность при отыскании геометрического центра изображения, проектируемого на светочувствительный экран (например, фотокатод), способны обеспечить телевизионные датчики — диссекторы (см. § 11). Это свойство диссекторов позволило создать высокоточный диссекторный датчик линейных смещений для створных измерений*.

Для осуществления створных измерений с использованием диссектора опорная линия в пространстве задается сколлимированным потоком излучения газового лазера. Излучение ОКГ направляется через светофильтр непосредственно на фотокатод диссектора, закрепленного над выверяемой точкой створа (рис. 77).

Диаметр сколлимированного пучка лучей лазера выбирают от 10 до 20 мм, при этом допустимая величина смещения Δ, опре-

---

* Датчик разработан в Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

деляемая диаметром фотокатода диссектора, составляет около 5 мм.

Блок-схема диссекторного датчика линейных смещений и временные диаграммы его работы показаны на рис. 78.

Схема датчика включает в себя: диссектор *1* (рис. 78, *а*) с фокусирующей *2* и отклоняющей *3* катушками, генератор пилообразного тока *4*, нуль-орган *5*, усилитель-ограничитель *6*, триггер *7*, электронные ключи *8*, *9*, регистрирующий микроамперметр *10*.

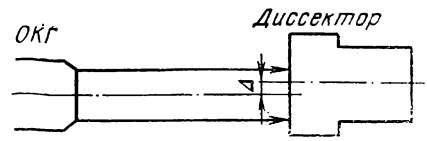


Рис. 77. Схема определения центра лазерного луча диссектором

Если на фотокатод диссектора *1* (рис. 78, *б*) приходит световой лазерный пучок, смещенный на величину Δ вдоль одной из координатных осей, то электрооптическое изображение пучка отклоняется вдоль вырезающего отверстия током *i* пилообразной формы (рис. 78, *б* поз. *b*) и на выходе диссектора снимается электрический сигнал (см. рис. 78, *б*, поз. *c*). На триггер *7*

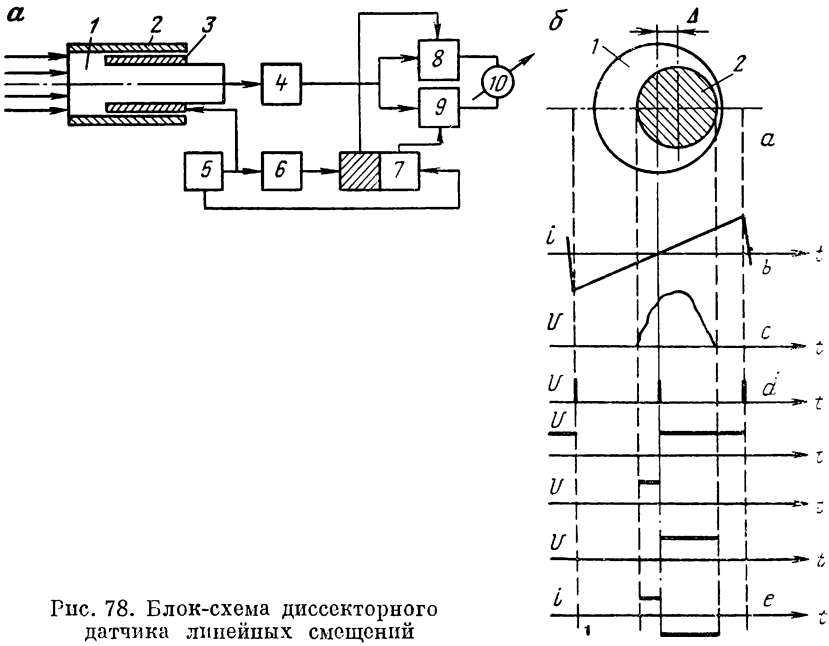


Рис. 78. Блок-схема диссекторного датчика линейных смещений

(см. рис. 78, *а*) поступают управляющие импульсы (рис. 78, поз. *d*) с генератора пилообразного тока в момент времени, соответствующий обратному ходу развертки, и с нуль-органа в момент, когда ток в отклоняющих катушках равен нулю, одновременно через вырезающее отверстие диафрагмы диссектора поступает сигнал от центра фотокатода. Триггер *7* переключает ключи *8* и *9*

и на выходе их выделяются электрические импульсы (рис. 78, *б*, поз. *е*), которые интегрируются микроамперметром.

Величина и знак тока регистрирующего микроамперметра зависят от величины и направления смещения Δ оптической оси лазерного луча с оптической оси диссектора.

Электронная схема регистрирующей части диссекторного датчика показана на рис. 79.

Она включает в себя усилитель-ограничитель, выполненный на транзисторах *T1* и *T2*, генератор пилообразного напряжения, собранный на транзисторах *T3—T9*, нуль-орган (транзисторы *T12—T14*), усилитель мощности генератора пилообразного тока (транзисторы *T18—T20*), триггер, выполненный на основе микросхемы ЛБ011, электронные ключи, собранные на транзисторах *T10* и *T11* и микросхеме ЛБ013.

Регулировка уровня сигнала усилителя-ограничителя осуществляется потенциометром *P1*, частота развертки генератора пилообразного тока регулируется потенциометром *P15*. Делитель, выполненный на транзисторах *T27* и *T28*, используется в схеме для питания микросхем.

В качестве резистора в схеме датчика применен стрелочный микроамперметр типа М24 с пределами измерений от 30 до +300 мкА и внутренним сопротивлением 600 Ом.

Экспериментальные исследования диссекторного датчика линейных смещений показали, что при токе расфокусировки 21 мА и напряжении питания диссектора 1200 В позиционные характеристики датчика при разных диаметрах приходящего лазерного луча хорошо согласуются с линейным законом. Средняя квадратическая ошибка наведения составила 6,4 мкм, а ошибка определения смещений объекта не превышала 38 мкм в диапазоне линейных смещений ±5 мм.

Отдельную группу высокоточных оптико-электронных устройств для определения линейных смещений при створных измерениях составляют датчики, основанные на время-импульсном принципе сканирования светового пятна от лазерного луча, задающего опорную линию. При использовании таких датчиков световой пучок лазера проектируется на маску, в которой вырезана прямоугольная или радиальная щель, совершающая сканирующие перемещения в продольном или круговом направлении [12].

Опыт применения подобных устройств [105] выявил ряд их недостатков, главные из которых — сложность в создании возвратно-поступательных сканирующих перемещений необходимой частоты в случае применения прямоугольной сканирующей маски, непостоянство скорости сканирования и непостоянство угла наклона сканирующей щели к продольной оси в случае применения вращающихся дисков с радиальными щелями.

Однако высокая точность и простота конструкции позволяют их в ряде случаев применять на практике. Для производства

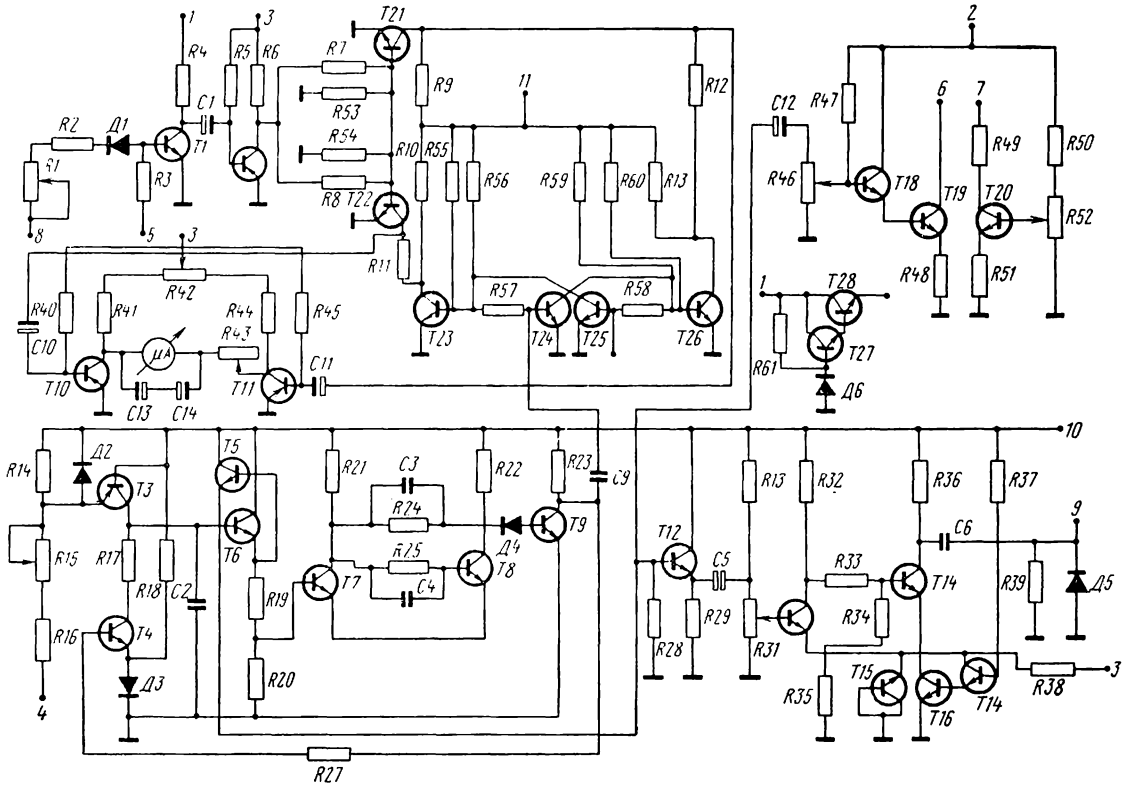


Рис. 79. Электрическая схема регистрирующей части диссекторного датчика

створных измерений одновременно по двум координатам в Ереванском политехническом институте (ЕрПИ) была предложена [105] схема дискового сканирующего устройства; опорная прямая в пространстве создается потоком излучения ОКГ и зонной пластиной. Свет от лазера зонной пластиной формируется в ее фокальной плоскости в световое пятно в виде креста, проектируемого на экран *1* (рис. 80). Экран *1* содержит координатные щели *Г* и *В*, отверстия *5* и *7* для формирования стартовых импульсов. За экраном расположен диск *2*, содержащий радиальную щель *3*. Источники подсветки *6*, *8* и фотодиоды *4*, *9* при вращении

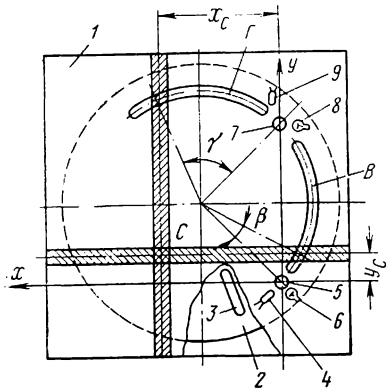


Рис. 80. Дисковое сканирующее устройство

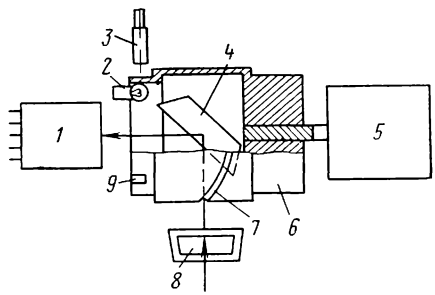


Рис. 81. Датчик линейных смещений с вращающимся барабаном

диска *2* формируют стартовые импульсы ($U_{\text{гориз}}$ и $U_{\text{верт}}$), которые далее поступают в блок обработки информации. Временные интервалы, определяемые блоком обработки информации между стартовыми импульсами и импульсами от лучей креста, проходящих сквозь координатные щели *Г* и *В* и радиальную щель *3*, соответствуют координатам центра креста относительно центра экрана.

Щели *Г* и *В* экрана имеют переменную кривизну и в каждой точке на оси щели углы γ и β пропорциональны соответственно абсциссе x_c и координате y_c.

Ошибки за непостоянство угла наклона щели *3* к осям симметрии щелей *Г* и *В* могут быть учтены соответствующей методикой обработки результатов измерения. Погрешность за непостоянство скорости сканирования, вызываемая девиацией скорости вращения ротора электродвигателя и свойственная всем время-импульсным сканирующим устройством, накладывает особые требования на стабилизацию скорости вращения диска и требует периодического контроля, проводимого через определенное число циклов измерения.

Как показали производственные исследования [105], на створе протяженностью 293 м инструментальная средняя квадратиче

ская ошибка такого датчика составила 50 мкм в диапазоне линейных смещений 100 мм.

Оптико-электронное сканирующее устройство, свободное от недостатков, свойственных дисковым время-импульсным сканаторам, разработано совместно ЕрПИ и Государственным союзным проектным институтом (ГСПИ). Схема датчика линейных смещений с вращающимся барабаном приведена на рис. 81.

Пучок лучей от лазера сквозь маску *8* проектируется на боковую поверхность барабана *6*, на боковой поверхности которого по винтовой линии вырезана щель *7*.

Если электродвигатель *5* вращает барабан с постоянной угловой скоростью, то отрезок щели *7* по винтовой линии сканирует вдоль маски с постоянной линейной скоростью. Пройдя через щель внутрь барабана, свет отражается зеркалом *4* на светочувствительную площадку фотоэлектронного умножителя *1*.

Осветитель *2*, фотодиод *3* и дополнительная щель *9* в барабане при его вращении формируют импульсы начала отсчета.

Величина смещения центра лазерного луча относительно датчика определяется подсчетом числа импульсов цифровым счетчиком от специального кварцевого генератора, заполняющего интервалы между импульсами.

Интервал t_1 между моментом формирования переднего фронта импульса от фотодиода *3* и моментом формирования переднего фронта видеоимпульса ФЭУ, а также длительность t_2 видеоимпульса и временно́й интервал t между передним фронтом импульса от фотодиода и серединой видеоимпульса связаны соотношением

$$t = t_1 + \frac{t_2}{2}, \tag{97}$$

где t — время, между моментом формирования переднего фронта импульса от фотодиода и серединой видеоимпульса.

Умножив обе части уравнения на удвоенную частоту $2f$ счетного генератора импульсов, получают выражение

$$2ft = 2ft_1 + ft_2. \tag{98}$$

Как видно из (98), число импульсов от генератора частоты $2f$, укладывающееся в промежуток времени t, соответствует сумме импульсов от генератора частоты $2f$ за время t_1 и импульсов от генератора частотой f за время длительности видеоимпульса t_2.

Относительная ошибка измерений линейных смещений подсчитывается из соотношения

$$\left|\frac{\Delta x}{x}\right| = \left|\frac{\Delta N}{N}\right| + \left|\frac{1}{n}\right|, \tag{99}$$

где x — координата светового луча; N — число оборотов барабана за 1 мин; n — число импульсов кварцевого генератора, отсчитанное за время t с частотой их следования $2f$.

Приведем блок-схему отсчетного устройства обработки информации (рис. 82).

Передний фронт импульса от фотодиода по каналу *1* поступает на соответствующие входы триггеров *Тр1* и *Тр2* и открывает электронные ключи *К1* и *К3*. Пересчетная схема (ПС) начинает счет импульсов от кварцевого генератора КГ с частотой их следования $2f$. При появлении видеоимпульса от ФЭУ (канал 2) вновь срабатывает триггер *Тр1*. Ключ *К1* закрывается, а ключ *К2* — открывается и счет импульсов в пересчетной схеме продолжается, но уже с вдвое меньшей частотой f, так как триггер *Тр3* работает в счетном режиме. По окончании длительности видеоимпульса его задний фронт заставляет сработать триггер *Тр2* (канал 3) и при этом ключ *К3* закрывается. Счет числа импульсов в пересчетной схеме прекращается. Зафиксированное число импульсов в пересчетной схеме пропорционально измеряемой координате, т. е. величине линейного смещения.

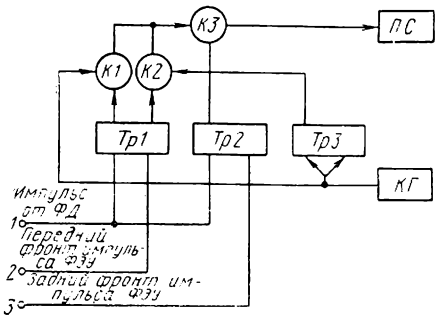


Рис. 82. Блок-схема устройства обработки информации

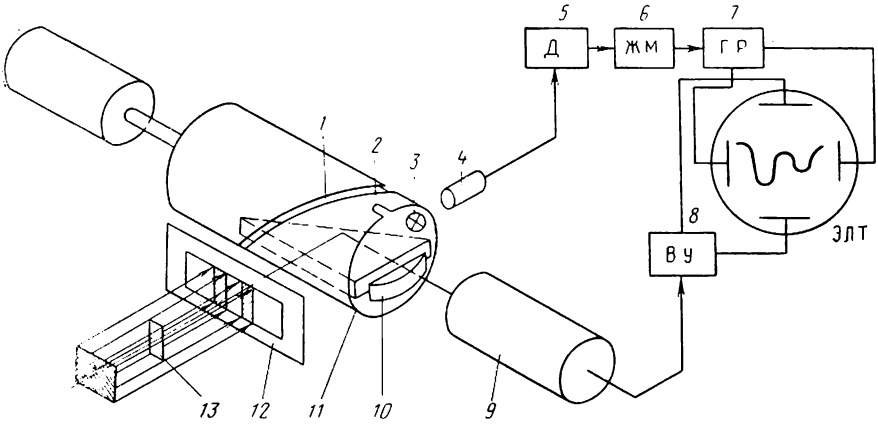


Рис. 83. Регистрирующее устройство осциллографического типа

Исследования устройства и его модификаций, отличающихся в основном конструктивным расположением отдельных элементов, показали их высокие точности. Средняя квадратическая ошибка измерения линейных смещений составила ~25 мкм на створах протяженностью около 50 м.

Общая схема фотоэлектрического регистрирующего устройства осциллографического типа [111] представлена на рис. 83.

Вертикально расположенная полоса света от лазера, сформированная зонной пластиной, проектируется на маску *12*. На пути световых лучей непосредственно перед маской устанавливается специальная марка *13*, разделяющая световой пучок на маске на две части.

Сзади маски расположен барабан *11* со щелью *1*, вырезанной по винтовой линии на его боковой поверхности.

При вращении барабана от синхронного электродвигателя световое пятно на маске сканируется винтовой щелью и обе части светового пучка посредством зеркально-линзовой системы *10* последовательно направляются на фотокатод ФЭУ *9*.

Осветитель *3*, дополнительная щель *2* и фотодиод *4* при вращении барабана формируют опорный импульс, поступающий на вход амплитудного дискриминатора *5*.

Импульс с дискриминатора запускает ждущий мультивибратор *6*, а последний задним фронтом выходного импульса запускает генератор развертки *7*.

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение для пары горизонтально отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

В свою очередь импульсы с ФЭУ через видеоусилитель *8* поступают на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. На экране ЭЛТ наблюдается видеосигнал, имеющий форму двугорбого импульса, амплитуды каждой из половин которого находятся в определенной зависимости от положения марки *13* относительно границ светового луча.

Необходимая ширина d тени от марки рассчитывается по формуле [111]

$$d \simeq L - 2\,(2 \operatorname{ctg} \varphi + l \operatorname{csc} \varphi), \qquad (100)$$

где L — ширина светового пятна, спроектированного на маску; φ — угол наклона сканирующей щели к маске; l — ширина сканирующей щели.

При использовании в створофиксаторе газового лазера ЛГ-55, одномерной зонной пластины с фокусным расстоянием 40 м, угла наклона сканирующей щели к маске $\varphi = 72°$, высоты маски 1 мм, ширины сканирующей щели 0,5 мм и ширины светового пятна 2 мм средняя квадратическая ошибка введения марки в створ по признаку равенства амплитуд половин видеосигнала составила 20 мкм.

Среди других оптико-электронных устройств подобного типа, предназначенных для высокоточного определения линейных смещений объектов относительно референтной прямой, заданной оптическим излучением, следует указать на фотоэлектрический датчик с цилиндрической линзой и модулирующим растром в виде плоского диска. Особенностью такого датчика, разработанного

в МИИГАиК, блок-схема которого приведена на рис. 84, является наличие координатора, содержащего две щели, выполненные по спирали Архимеда.

Датчик содержит — цилиндрическую линзу *1*, диск со щелями *2* в виде спирали Архимеда, поворотные зеркала *3*, *4*, собирающие линзы *5*, *6*, фотоприемники *7*, *8*, блок электроники *9* и регистрирующее устройство *10*.

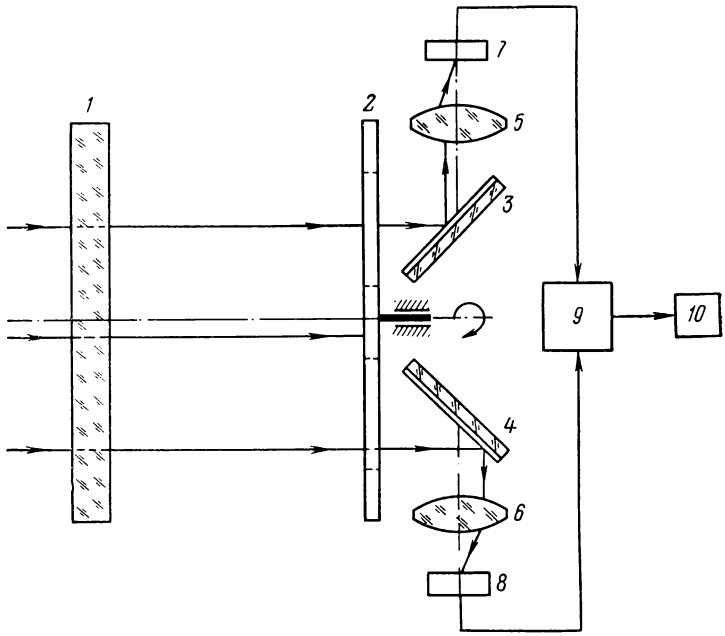


Рис. 84. Блок-схема датчика линейных смещений с координатором в виде двух спиралей Архимеда

На цилиндрическую линзу *1* падает пучок света от лазера диаметром D модулированной частотой $f_м$. Цилиндрическая линза преобразует падающий на нее поток излучения с расходимостью θ и в фокальной плоскости создает светящийся штрих длиной l и шириной d. Без учета аберраций ширина штриха d может быть подсчитана из выражения

$$d = f' \frac{\theta}{\rho}, \qquad (101)$$

где f' — фокусное расстояние линзы; $\rho = 206\,265''$.

В фокальной плоскости цилиндрической линзы помещен диск со щелями, выполненными в виде спиралей Архимеда, повернутыми относительно друг друга на 180° (рис. 85).

При вращении диска щели равномерно сканируют световой штрих, проходящий через ось его вращения. Применение двух

щелей позволяет одновременно просматривать противоположные участки штриха относительно центра вращения диска и тем самым определять величину нестворности.

Значение параметров щели ρ_0 и ρ_m выбираются в соответствии с необходимым диапазоном измерения возможных линейных перемещений и в зависимости от диаметра пучка излучения D.

Если ось пучка лазерного излучения совпадает с продольной геометрической осью датчика, то полученный в фокальной плоскости линзы штрих симметричен по отношению геометрической оси датчика. На фотоприемники при этом попадает одинаковое количество энергии и сигнал на выходе электронной схемы, представляющий разность импульсов (рис. 85, *а*), равен нулю. При смещении пучка излучения относительно геометрической оси датчика штрих перемещается в фокальной плоскости линзы и на фотоприемники приходят различные потоки энергии, при этом на выходе электронной схемы выделяется разность импульсов (рис. 85, *б*).

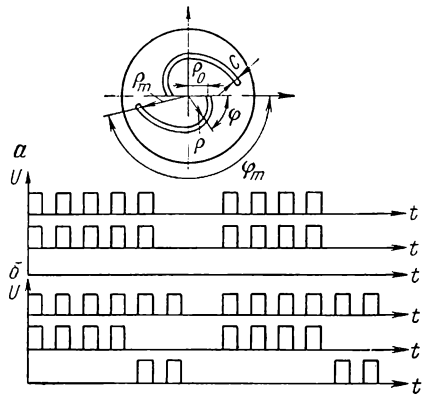


Рис. 85. Временная диаграмма работы датчика с двухщелевым диском

В случае работы датчика в аналоговом режиме (при отсутствии модуляции у осветителя) регистрирующим прибором будут фиксироваться разности амплитуд сигналов, снимаемые с фотоприемников. При модуляции потока излучения на передающем устройстве датчик работает в число-импульсном режиме.

Если рассогласование на входе датчика отсутствует, то на электронную схему поступают одинаковые по длительности пачки импульсов и результирующий сигнал на выходе электронной схемы равен нулю.

При смещении лазерного луча с оси датчика с каждого фотоприемника на электронную схему датчика поступают разные по длительности пачки импульсов. В этом случае выходной сигнал не равен нулю и разность импульсов определяет величину смещения луча с геометрической оси датчика.

Указанная разность импульсов в схеме электроники интегрируется и фиксируется на регистраторе.

Точность определения линейного смещения оси светового пучка от центра датчика зависит от частоты модуляции потока излучателя и линейной скорости сканирования щели вдоль штриха. Причем, чем выше частота модуляции $f_м$, тем меньшему линейному смещению соответствует один импульс. Так если требуемая точность измерения линейных смещений составляет 0,5 мм

то цена значения одного импульса должна быть примерно на порядок меньше и равной 0,05 мм.

При частоте $f_м$ модуляции потока излучения 5000 Гц линейная скорость сканирования $v = \Delta f_м$ составляет 250 мм/с, а угловая скорость ω вращения диска со щелями подсчитывается как

$$\omega = \frac{v\varphi_м}{2\pi(\varphi_0 - \varphi_m)}$$

и равна 5 $^1/_с$. Средняя квадратическая ошибка в определении линейных смещений датчиков по данным экспериментальных исследований составила 4,7 мкм в диапазоне линейных смещений ± 5 мм.

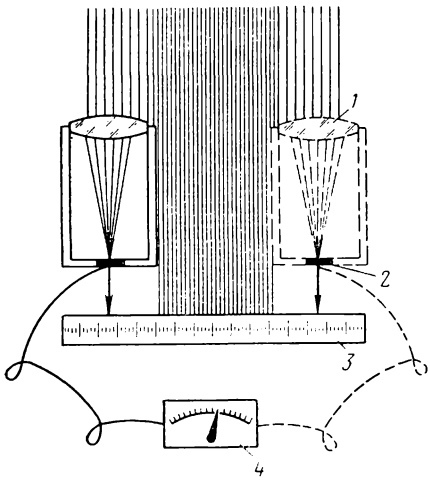


Рис. 86. Датчик линейных смещений с конденсором

При выполнении створных измерений среднего класса точности с применением лазерного луча возможно использование более простых по конструкции датчиков [17] (рис. 86).

Датчик содержит конденсорную линзу *1*, фотоприемник *2*, подвижную каретку *3* с нониусной шкалой, которая может перемещаться вдоль двух взаимно перпендикулярных осей. Конденсорная линза и фотоприемник установлены вместе на соответствующем расстоянии друг от друга и жестко связаны с кареткой.

Для отыскания центра лазерного луча вначале конденсор и фотоприемник помещают точно на краю светового пятна, а затем, медленно перемещая каретку вдоль пучка в направлении центра луча, по миллиамперметру *4* регистрируют изменение интенсивности пучка лучей. Примерно на середине расстояния между краем пучка и предполагаемым центром отмечают показания миллиамперметра и записывают отсчет по нониусной шкале, указывающей положение фотоприемника. Затем каретку передвигают в симметричную точку с противоположной стороны пятна таким образом, чтобы отсчеты на миллиамперметре были такими же, как и в первом случае. Вновь снимают отсчет по нониусной шкале. Среднее значение двух отсчетов по шкале соответствует положению фотоприемника для максимума интенсивности лазерного луча вдоль одной оси. Измерения по второй координате выполняются аналогично.

Конденсорная линза при любом положении фотоприемника собирает большую часть пучка лучей лазера и, кроме того, ста-

билизирует переменную интенсивность излучения, сглаживая влияние колебаний пучка из-за атмосферных условий на показания миллиамперметра.

Экспериментальные исследования такого устройства на дальность 500 м при быстро меняющихся состояниях атмосферы и применения для задания опорной линии гелий-неонового лазера мощностью 1 мВт с расходимостью луча 20″ и конденсорной линзы диаметром 5 см с фокусным расстоянием 10 см определили среднюю квадратическую погрешность в 0,5 мм [17].

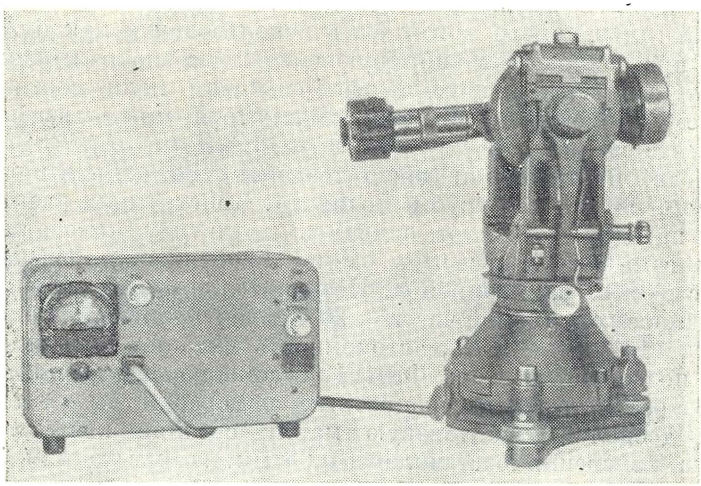


Рис. 87. Зрительная труба с фотоэлектрической насадкой

Большой интерес с точки зрения возможностей автоматизации створных измерений представляют различные фотоэлектрические насадки к геодезическим инструментам (ФЭНГИ). Такие насадки делают инструменты универсальными, давая возможность облегчить труд наблюдателя, повысить точность и надежность наблюдений, осуществлять визирование как ночью на светящуюся цель, так и днем на теневую марку.

В МИИГАиК была создана фотоэлектрическая насадка для теодолита ОТ-02, удовлетворяющая вышеперечисленным требованиям (рис. 87) [29].

В фокальной плоскости оптической системы теодолита расположена непрозрачная нить, совершающая под воздействием электрических колебаний от электронного генератора гармонические механические колебания.

Изображение цели модулируется колеблющейся нитью и проходящей сквозь разделительный куб свет направляется на фотоэлектронный умножитель и в окулярную часть трубы теодолита.

Электрический сигнал с ФЭУ имеет частоту, равную удвоенной частоте модуляции, в случае точного попадания центра изображения на нить, или частоту, равную частоте модуляции при уклонении изображения цели в ту или другую сторону от нити. Причем фаза электрического сигнала изменяется на 180° при переходе изображения с одной стороны нити на другую.

Усиленные электронным усилителем электрические сигналы поступают на частотно-фазовый детектор, куда также подается опорное напряжение от генератора. Фазовый детектор выпрямляет электрический сигнал в постоянный ток того или иного направления, измеряемый стрелочным гальванометром. Стрелочный гальванометр может быть использован и как нуль-индикатор при совмещении вибрирующей нити с изображением цели. Точное совмещение нити с изображением цели соответствует нулевому положению стрелки индикатора при наведении инструмента на цель.

Предварительное наведение теодолита на цель выполняется обычно через окуляр трубы теодолита. Конструкция электронной части насадки позволяет изменять амплитуду колебаний нити и тем самым согласовывать размер изображения освещенности цели с параметрами прибора. Незначительные габариты и малая масса (масса окулярной части — 20 г, электронного блока с источниками питания — 2 кг), автономность питания и высокая точность позволяют считать ФЭНГИ весьма перспективной.

По результатам многократных измерений при наведении трубы теодолита на теневую марку средняя квадратическая ошибка измерения составила $\sim$0,05 мм на расстоянии 50 м.

Таким образом, использование описанной насадки при выполнении створных измерений по методу подвижной марки позволяет существенно повысить точность и объективность измерений.

Глава VI

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

§ 25. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ И СРЕДСТВАМ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

Выверка прямолинейности направляющих, в процессе которой производится установка точек на заданную прямую или контроль ухода точек с заданной прямой, находит широкое применение в ряде отраслей промышленности.

При этом значительное место занимает выверка направляющих большой протяженности (до нескольких сотен метров) с высокой точностью; требования к точности направляющих чрезвычайно высоки и составляют $0{,}05 \div 0{,}1$ мм при допустимых отклонениях направляющих от прямолинейности как в плане, так и по высоте не более $0{,}3 \div 1{,}0$ мм.

Современная техника измерений располагает большим выбором средств и методов для проверки прямолинейности направляющих. Все методы условно можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся неавтоматические методы контроля прямолинейности, основанные на способах визуального наблюдения. Вторую группу образуют полуавтоматические и автоматические методы.

Оценку методов проверки прямолинейности направляющих можно производить по определенным параметрам, среди которых главными являются: точность измерений, предельные расстояния, объективность и производительность измерений, а также степень автоматизации и время обработки полученных результатов.

Для выверки направляющих большой протяженности с высокой точностью из методов первой группы при соответствующих условиях в качестве основных могут быть использованы:

измерения по натянутой струне с использованием оптического проектирующего прибора;

оптический метод визирования;

коллиматорные и автоколлиматорные измерения;

микронивелирование.

В некоторых случаях могут также применяться дифракционный, интерференционный методы измерения и гидростатическое нивелирование.

Метод измерения непрямолинейности по натянутой струне с использованием оптического проектирующего прибора нашел

применение в ряде отраслей промышленности [92], [58]. Он основан на измерении величины смещения изображения струны, натянутой вдоль контролируемой направляющей, относительно перекрестия окулярного микрометра отсчетного микроскопа.

Предельная ошибка плановой установки направляющих в проектное положение при использовании натянутой струны и оптического проектирующего прибора составляет 0,05 ÷ 0,3 мм.

Проверка прямолинейности направляющих по методу оптического визирования заключается в визировании с помощью зрительной трубы на различно удаленные марки, устанавливаемые на контролируемую поверхность. Зрительная труба имеет отсчетные устройства, позволяющие определять величины смещения марок, вызываемые отклонениями поверхности контролируемой направляющей от прямолинейности [56]. Разность между отсчетами в каждом положении марки и в начальной точке наблюдений дает величину смещения наблюдаемых точек поверхности от прямолинейности.

Обычным зрительным трубам присущ тот недостаток, что при перефокусировке на различно удаленные марки, возникают ошибки визирования вследствие взаимного смещения перекрестия сетки нитей и центра фокусирующей линзы [80]. Для исключения ошибок визирования при перефокусировке приходится усложнять конструкции зрительных труб в оптических схемах, использовать аксиконы или применять зрительные трубы двойного изображения [34], [104].

Точность проверки прямолинейности, достигаемая оптическим методом визирования, высокая. Так, погрешность измерений оптической струной ДП-477 составляет в угловой мере 0,5″ [56]. Визирная зрительная труба ППС-11 с приспособлениями для проверки прямолинейности обладает пределами измерений смещений марки в 1 мм, погрешность измерения смещения марки в плоскости, перпендикулярной к визирной оси, равна $(0{,}01 + \frac{L}{200})$ мм, где L выражено в метрах [72].

Высокая точность проверки прямолинейности направляющих различных сооружений достигается также применением коллиматора и визирной зрительной трубы [60], [72].

Средняя квадратическая ошибка определения отклонений направляющих от прямолинейности указанным методом составляет 10 ÷ 15 мкм [60].

В последние годы широкое распространение получил автоколлимационный метод контроля прямолинейности. Особенностью автоколлимационного устройств является их высокая чувствительность к незначительным угловым взаимным перемещениям автоколлиматора и отражающего зеркала, так как при повороте зеркала на какой-либо угол лучи света отклоняются на удвоенную величину поворота. При существующих системах окуляров и практически распространенных фокусных расстояниях качественный

автоколлимационный блик можно обнаружить на расстоянии, не превышающем 50 м. При этом по мере удаления зеркала от объектива автоколлиматора возрастает виньетирование, автоколлимационное изображение уменьшается и яркость его падает [25].

Для упрощения процесса измерения и записи углов поворота отражателя возможно использовать двухкоординатный автоколлимационный отражатель — тетраэдр, две наружные грани которого посеребрены. При проверке такого отражателя относительно двух координатных осей оба автоколлимационных изображения перемещаются по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Величина линейного смещения отражателя по каждой из осей координат пропорциональна двойному углу поворота отражателя в соответствующей плоскости [30].

Линейные измерения можно осуществить автоколлимационным методом сходящимся пучком лучей, сфокусированным на ребро зеркального диэдра или триэдра. В случае применения диэдра линейные измерения осуществляются в одной плоскости. Двухкоординатную выверку обеспечивает использование триэдра [103].

Точность данного метода вдвое выше, чем метода визирной трубы и марки. Вместе с тем ошибка из-за неправильной работы фокусирующего устройства остается такой же [30].

Автоколлимационные трубы двойного изображения, работающие в сходящихся пучках лучей, учетверяют по сравнению с методом «трубы и марки» точность измерений и исключают ошибки из-за непрямолинейности хода фокусирующей линзы. Для выверки направляющих большой протяженности по высоте с высокой точностью до настоящего времени основными являются методы микронивелирования. Средняя квадратическая ошибка в определении взаимного положения двух точек направляющих, находящихся друг от друга на расстоянии в 1 м, при микронивелировании составляет около $5 \div 8$ мкм.

Обладая высокой точностью, описанные методы контроля прямолинейности, трудоемки и малопроизводительны, они являются шаговыми методами, и поскольку отсчет показаний снимается визуально, то и точность измерений во многом определяется субъективными качествами наблюдателя. Методы требуют дополнительной обработки результатов измерения.

Дифракционный и интерференционный методы выверки прямолинейности, основанные на использовании физических явлений — дифракции и интерференции света, также являются шаговыми методами и даже в случае их автоматизации остаются трудоемкими и малопроизводительными. Точность дифракционного метода створных наблюдений зависит от качества изготовления аппаратуры, тщательности ее выверки и возможностей самого метода. Средняя квадратическая ошибка наведения составляет ориентировочно 15 мкм для створа длиной около 25 м.

В ряде случаев для контроля протяженных направляющих применяют гидростатическое нивелирование [57].

Рассмотренные неавтоматические методы проверки прямолинейности направляющих не охватывают всего многообразия известных методов и средств. Являясь основными, они могут дополнить друг друга при их использовании в комплексе.

Стремление перейти к объективным и достаточно производительным методам контроля прямолинейности направляющих большой протяженности привели к разработке и созданию ряда полуавтоматических и автоматических методов и устройств. По принципу действия используемых датчиков их можно условно разделить на два класса: на инерционные и безынерционные.

В инерционных приборах для контроля прямолинейности в качестве чувствительных элементов используются отвес или уровень. Эти устройства могут обеспечить выверку прямолинейности направления только одной координаты (по высоте), в силу этого и получили общее название нивелир-автоматов.

Первый проект механического нивелир-автомата был предложен в 1845 г. профессором С. И. Барановским. В приборе С. И. Барановского тяжелый маятник с помощью зубчатой рейки перемещал ролик фрикциона интегратора, а диск фрикциона приводился во вращение от колеса прибора, измеряющего пройденное расстояние. Число обортов ролика фрикциона в этом случае было пропорционально интегралу от произведения синуса текущего угла наклона маятника на пройденное расстояние, т. е. превышению текущей точки, в которой находится прибор, над точкой, откуда начато нивелирование.

В дальнейшем были созданы новые нивелир-автоматы П. М. Леонтовским (1915 г.), П. К. Нечипоренко (1925 г.), Ф. В. Дробышевым (1929 г.), Е. В. Раабеном (1934 г.), М. А. Артановым (1935 г.), М. М. Губиным (1945 г.) и другими учеными.

В нивелире Артанова в качестве чувствительного элемента использовался шарнирный маятник, подвешенный на раме передвигающейся трехколесной тележки. Датчик фиксировал угол относительно продольной оси прибора и воздействовал на ведомое звено фрикционного интегратора, связанного с записывающим устройством, имеющим привод от мерного колеса тележки. Датчик был выполнен в виде двух с различными плечами качания спаренных маятников, которые с целью устранения ошибок в показании прибора взаимодействовали с интегратором через дифференциальную систему таким образом, чтобы ведущий и ведомый диск интегратора при воздействии на маятники инерционных сил отклонялись при этом на разные углы от вертикали, сохраняя взаимное направление вдоль оси ведомого диска [5].

В 1948 г. был создан [73] механический профилограф, в котором для уменьшения погрешности от проскальзывания в центре диска в кинематическую цепь был введен дифференциал, что смещало ролик в одну сторону от центра диска.

Конструкции нивелир-автоматов [2, 69, 94] отличаются друг от друга по исполнению, по типу фрикционного счетнорешающего механизма, но принцип аналогичен и погрешность приборов составляет около 30 см на 1 км хода.

Общим недостатком механических нивелир-автоматов является малая чувствительность маятника из-за трения в фрикционной паре и проскальзывание в счетнорешающем механизме, которое возникает в динамике при интегрировании превышений.

Применяемый в них в качестве чувствительного элемента отвес под влиянием возмущающих воздействий горизонтальных ускорений превращается в маятник, совершающий сложные колебания около положения равновесия. Эти колебания являются источником дополнительных динамических ошибок и требуют введения в схему прибора корректирующих устройств.

В [127] приводятся результаты испытания профилографа типа Раабена, в котором для компенсации влияния на чувствительный элемент горизонтальной составляющей продольного ускорения в отсчет элементарного превышения вводилась поправка с датчика угловых ускорений.

Точность измерения непрямолинейности оказалась невысокая: для участка рельсового пути в 200 м относительная систематическая ошибка составила 0,0003 а средняя квадратическая случайная ошибка 2,2 см.

Не решают проблему автоматической высокоточной выверки направляющих и попытки применения в качестве задающих направление элементов емкостных датчиков, выполненных в виде ампулы уровня, помещенной между обкладками конденсатора [63]. Эти датчики также являются инерционными; продольные ускорения неизбежно возникающие при движении ампулы, приводят к дополнительным перемещениям пузырька уровня относительно обкладок конденсатора. Это обстоятельство вносит дополнительные ошибки в измерения и накладывает высокие требования к равномерности скорости движения нивелир-автомата.

Для автоматического измерения относительных высот местности в МИИГАиК были разработаны нивелир-автоматы, устанавливаемые на автомашинах. В этих нивелир-автоматах датчиком угла наклона является свободный от механических связей маятник, который от действия горизонтальных ускорений корректируется с помощью специальной системы. Для гашения колебаний маятника, возникающих от различных возмущающих воздействий, в приборах имеется магнитный демпфер [120]. Такая конструкция датчика и использование средств автоматики и счетно-решающей техники позволили при скорости движения 30 км/ч получить высокие результаты: средняя квадратическая ошибка нивелирования на 1 км двойного хода нивелир-автоматом АВА составляет около 10 см [20].

Аналогичные конструкции нивелир-автоматов, разработанных за границей (например, нивелир-автомат Джонсона, выпущенный

в США компанией «Сперри»), имеют среднюю квадратическую ошибку на 1 км одиночного хода 0,3—0,6 м [138].

При выполнении ряда строительных работ, связанных с точной геодезической подготовкой направления и профиля будущих сооружений, применяется прибор управления лучом (ПУЛ).

Точности определения прямолинейного направления системами ПУЛ достаточно высокие и составляют по данным работ [74], [115], [24] в угловой мере величину порядка нескольких секунд. Однако неравноточность измерений на различных протяженностях и дискретность метода измерения ограничивает возможности применения системы ПУЛ для высокоточной проверки направляющих большой протяженности.

Проверка прямолинейности направляющих по методу «промежуточной призмы» [66] также имеет ряд недостатков. В этом методе в зависимости от местоположения призмы между коллиматором и зрительной трубой, даже если колебания луча и находятся в заданных углах, изменяется виньетирование пучка лучей, принимаемых зрительной трубой, и величина линейных смещений луча со входного зрачка трубы. Это вносит дополнительные потери энергии и существенно ограничивает как длину поверяемых направляющих, так и диапазон возможных отступлений от прямолинейности.

Из изложенного следует, что ни один из перечисленных методов не удовлетворяет в полной мере требованиям, предъявляемым к двухкоординатной высокоточной автоматической выверке направляющих большой протяженности. Неавтоматические методы контроля, обеспечивая высокую точность выверки, трудоемки и малопроизводительны, большинство из них позволяет производить контроль прямолинейности только на ограниченных расстояниях. Процесс обработки результатов измерения требует значительного времени.

Известные полуавтоматические и автоматические методы контроля не обеспечивают требуемых точностей выверки либо в силу инерционности применяемых датчиков, либо по причине принципиальных ограничений, заложенных в самих методах.

На основании анализа известных методов и средств для проверки прямолинейности можно сделать вывод о целесообразности использования для решения указанной задачи устройств, основанных на применении безынерционных датчиков направления. В этом случае отпадает необходимость компенсации влияния ускорений, такие датчики, будучи свободными от воздействия сил тяготения, позволят вести контроль прямолинейности одновременно в высотной и плановой координатах.

Существующие геодезические методы и приборы позволяют осуществлять линейные и угловые измерения с высокой точностью, но не могут обеспечить требуемую точность измерения взаимного расположения точек через малые отрезки (1 ÷ 3 м). Метрологические приборы и приборы точного машиностроения обеспечи-

вают высокую точность выверки прямолинейности направляющих на небольших отрезках, но они не применимы для измерений на расстояниях в сотни и тысячи метров.

Следовательно, методика высокоточной выверки прямолинейности направляющих большой протяженности должна сочетать в себе геодезические способы определения положения точек, расположенных на значительных расстояниях, и метрологические способы точных измерений близко лежащих точек.

Высоким требованиям, предъявляемым к точностям выверки направляющих, более всего удовлетворяют оптические и оптико-электронные устройства и методы. Поэтому решение задачи автоматической выверки прямолинейности направляющих большой протяженности с высокой точностью должно идти по пути использования современных достижений оптико-электронного приборостроения и средств счетно-решающей техники, позволяющих не только автоматически следить за заданным референтным направлением, но и автоматизировать процесс обработки результатов измерения.

§ 26. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Выбор метода измерения при контроле прямолинейности является определяющим в успешном решении задачи. Метод измерения должен обеспечивать необходимую точность выверки, позволять применять при контроле прямолинейности достаточно несложные измерительные средства, осуществлять выверку направляющих путей в вертикальной и горизонтальной плоскостях и давать возможность автоматизировать процесс измерения.

Сущность любого метода контроля прямолинейности состоит в измерении отклонений отдельных точек базовых поверхностей направляющих путей от прямой. Положение базовой линии направляющей в пространстве может быть описано уравнением линии пересечения двух плоскостей, касательных к базовым поверхностям. Так как выверка направляющих путей часто осуществляется в плане и по высоте, то базовую линию направляющей в пространстве удобно представить в прямоугольных координатах x, y, z (рис. 88). Примем за ось x опорную линию, соединяющую начало и конец направляющих путей и задающую прямолинейность. Проекцию базовой линии направляющей на горизонтальную плоскость можно выразить уравнением кривой

$$y = f(x). \tag{102}$$

Проекция базовой линии на вертикальную плоскость задается уравнением

$$z = \varphi(x). \tag{103}$$

Для измерения отклонения точек проекций базовой линии направляющих путей $y = f(x)$ и $z = \varphi(x)$ от прямолинейности

можно при использовании фотоэлектрических устройств применять методы прямого измерения и последовательного интегрирования.

В методе прямого измерения определение смещений отдельных точек направляющих путей от прямолинейности осуществляется относительно референтной линии, задаваемой оптическим лучом вдоль выверяемых путей, непосредственно при помощи высокоточных датчиков.

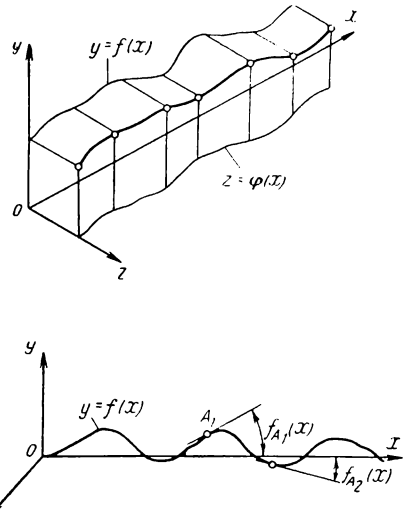


Рис. 88. Изображение базовой линии направляющей в координатных плоскостях

В качестве датчиков для измерения отклонений направляющих от прямолинейности можно использовать фотоэлектрические датчики линейных смещений, аналогичные применяемым при створных измерениях. Такие датчики должны непосредственно базовой точкой своей опоры устанавливаться на базовую поверхность контролируемой направляющей, а механизм закрепления их на направляющей должен обеспечивать надежное контактирование с поверхностью направляющей и сохранять неизменным в пространстве положение оптической оси датчика при его перемещении вдоль контролируемой направляющей.

Поскольку датчики для измерения линейных смещений имеют ограниченный рабочий диапазон, то при применении их для контроля направляющих, имеющих значительные отклонения от прямолинейности, необходимо в схему датчиков вводить измерительные компенсирующие устройства, расширяющие измерительные возможности датчиков. Последнее обстоятельство накладывает серьезные требования к кинематической схеме прибора и снижает его быстродействие.

Блок-схема устройства, основанного на прямом методе измерения, показана на рис. 89, где *I* — осветительная система; *II* — приемная регистрирующая система.

Фотоэлектрическое устройство *1*, опирающееся на выверяемые направляющие пути при движении вдоль них из-за отклонения отдельных точек этих путей от прямолинейности, смещается относительно опорной линии, задаваемой осветительной системой. Величины этих смещений преобразуются счетно-решающим устройством *2* в электрические сигналы и подаются на регистриру-

ющее устройство *4*. Сюда же приходят сигналы от датчика пути *3*. Таким образом, на регистрирующих устройствах может быть автоматически зафиксирована непрямолинейность направляющих путей.

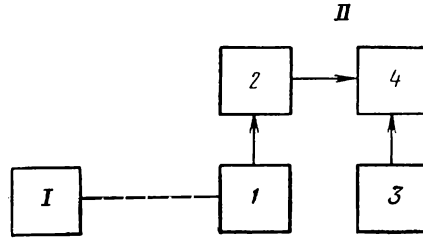


Рис. 89. Блок-схема устройства для контроля прямолинейности

К достоинствам метода прямого измерения следует отнести сравнительную простоту конструкции автоматических измерительных средств. Однако по мере удаления датчика от передающего устройства из-за расходимости излучения увеличиваются линейные размеры светового пучка, что служит причиной уменьшения точности регистрации отступлений направляющих путей от прямолинейности в зависимости от расстояния между передающим и приемным устройствами. При работе на открытых площадках на точность измерения существенное влияние может оказывать температурная турбулентность атмосферы, вызывающая хаотическое дрожание референтной опорной прямой.

Блок-схема следящей системы, реализующая принципы прямого метода измерения, приведена на рис. 90 [109].

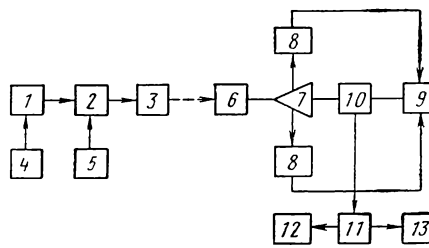


Рис. 90. Блок-схема следящей системы:

1 — лазер, *2* — модуллятор, *3* — коллиматор, *4* — блок питания лазера, *5* — генератор модулирующего напряжения, *6* — оптический селектор, *7* — зеркальная призма, *8* — фотоприемник, *9* — усилители, *10* — реверсивный электродвигатель, *11* — координатор, *12* — самописец, *13* — цифровой индикатор

Такая лазерная система автоматического непрерывного контроля позволяет решать ряд инженерно-геодезических задач, в том числе и контроль прямолинейности.

Лазерная система состоит из трех узлов: лазерного излучателя, фотоприемного блока и блока обработки информации. В качестве излучателя в приборе применен гелий-неоновый лазер, поток излучения которого специальными оптическими устройствами формирует в пространстве опорную линию.

Следящая система включает в себя фотоэлектрическую приемную головку, направляющие штанги и сервопривод, кинематически связанный с фотоприемной головкой. Фотоэлектрическая приемная головка содержит интерференционный и красный фильтры, анализатор, выполненный в виде светоделительной призмы, и светочувствительные элементы — фотоэлектрические умножители.

При появлении сигнала рассогласования на входе следящей системы из-за смещения светоделительной грани анализатора с энергетической оси светового луча в электрической схеме прибора создается управляющий сигнал, напряжение, амплитуда и полярность которого определяются характером и величиной сдвига фотоприемного устройства относительно луча. Управляющий сигнал, поступая в устройства сервопривода, осуществляет возврат призмы на центр луча. Положение фотоприемного блока относительно центра луча определяется непрерывно и фиксируется самописцами. Такая лазерная система работает как в режиме поиска, так и слежения.

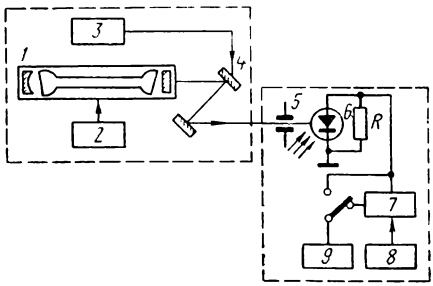


Рис. 91. Блок-схема сканирующего лазерного устройства:

1 — лазер, *2* — блок питания лазера, *3* — электромагнитный сканер, *4* — колеблющееся зеркало, *5* — диафрагма, *6* — фотодиод, *7* — усилитель, *8* — блок питания усилителя, *9* — осциллограф

Режим поиска вступает в работу в случае потери луча фотоприемным устройством.

Поисковое устройство отыскивает луч и затем включает режим слежения. В указанной лазерной системе применен лазер с мощностью излучения 2 мВт, угловой расходимостью луча после формирующего оптического устройства 20″.

Экспериментальные исследования такой системы при благоприятных внешних условиях позволили определить ее точностные характеристики: 2 мм на расстоянии 200 м [109].

В ряде случаев для контроля прямолинейности ограниченных по протяженности направляющих может быть применено лазерное устройство, в котором референтная опорная прямая формируется сканирующим излучением оптического квантового генератора [53] (рис. 91).

В качестве источника излучения в схеме устройства применен гелий-неоновый лазер, возбужденный на низшем поперечном типе колебаний с нормальным распределением энергии в поперечном сечении луча. Луч лазера сканируется по углу в пределах, не превышающих угла его расходимости. Фотоэлектрический детектор, укрепляемый на выверяемой точке направляющей, представляет собой фотоприемник с диафрагмой, диаметр которой значительно меньше диаметра сечения луча.

При смещении диафрагмы вместе с фотоприемником с оси луча в электрическом сигнале, снимаемом с фотоприемника, появляется переменная составляющая с частотой сканирования луча, пропорциональная по амплитуде крутизне кривой распределения энергии по сечению луча в точке расположения диафрагмы. В случае совпадения геометрического центра диафрагмы с осью сканиру-

ющего луча сигнал с фотоприемника содержит переменную составляющую с удвоенной частотой сканирования.

Фаза переменной составляющей электрического сигнала при данном способе измерения по отношению к закону сканирования зависит от направления смещения диафрагмы относительно оси луча.

Измерительная схема устройства содержит избирательный усилитель, настроенный на частоту сканирования, и соосное положение диафрагмы относительно оптической оси луча определяется по минимальному сигналу на выходе избирательного усилителя.

При расходимости излучения лазера 2′ и мощности излучения 0,2 мВт, частоте сканирования луча 800 Гц и диаметре диафрагмы 0,2 мм на расстояниях до 200 м при помощи указанного устройства в лабораторных условиях была достигнута точность определения положения отдельных точек в 20 мкм [53].

Точность контроля прямолинейности с применением такого устройства определяется многими факторами и в первую очередь мощностью лазера, углом сканирования луча, флуктуациями мощности излучения лазера, флуктуациями оптической плотности воздуха на трассе распространения луча и эффективностью подавления второй гармонической составляющей в электрическом тракте. Поэтому достичь высокой точности и значительной производительности измерений при использовании устройств подобного типа на больших протяженностях в условиях открытой площадки представляется затруднительным, так как необходимость коллимации потока излучения лазера не всегда может обеспечить приемлемые энергетические соотношения.

Отмечая несомненную перспективность прямого метода измерения прямолинейности, следует указать на то, что в настоящее время пока не создано достаточно эффективных и высокопроизводительных фотоэлектрических автоматических устройств, работающих на вышеуказанных принципах.

В МИИГАиК был предложен [59] и исследован автоматический метод контроля прямолинейности с использованием ОКГ и оптико-электронной измерительной системы, основанный на способе последовательного интегрирования. В соответствии с вышепринятыми обозначениями ордината кривой (базовой поверхности направляющей) $y = f(x)$ в текущей точке при условии, что $y(0) = 0$, может быть записана как

$$y(x_i) = \int_0^{x_i} f'(x)\,dx. \tag{104}$$

Соответственно

$$z(x_i) = \int_0^{x_i} \varphi'(x)\,dx. \tag{105}$$

Производные проекций базовой кривой $f'(x)$ и $\varphi'(x)$ по пути равны тангенсам углов между осью x и касательными к кривым $y = f(x)$ и $z = \varphi(x)$.

Вследствие малости величин $f'(x)$ и $\varphi'(x)$ тангенсы углов, выраженных этими величинами, можно принять равными углами в радианной мере.

Таким образом, метод последовательного интегрирования заключается в последовательном интегрировании величин угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющих путей от опорной референтной линии.

Анализируя выражения (104), (105) и учитывая, что в основу метода заложено предположение о наличии опорной линии, задающей прямолинейность, устройство для автоматического контроля прямолинейности направляющих путей можно представить как совокупность пяти элементов, выполняющих следующие операции: задание прямолинейной референтной опорной линии, непрерывное измерение угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющих от опорной линии, отсчет пути от начала контролируемого участка направляющей до текущей измеряемой точки, последовательное интегрирование угловых отклонений по пути, непрерывную регистрацию полученных результатов интегрирования.

Структурная схема такого устройства определяется способом задания опорной линии и выбором каждого из элементов, решающих описанные операции.

Выбор параметров фотоэлектрического устройства следует производить в соответствии с требованиями к точности измерения величин, входящих в основное уравнение метода последовательного интегрирования (104).

В выражении (104) функцию $y = f(x)$ можно рассматривать от двух переменных $f'(x)$ и x, измеряемых независимо, причем с изменением абсциссы x от 0 до $x_{\max}$ величина $f'(x)$ может принимать значения в пределах от 0 до $\psi_{\max}$, где $\psi_{\max}$ — максимальная величина угла между касательной к кривой $y = f(x)$ и осью x.

Полагая, что точность определения смещения точек направляющей от прямолинейности должна быть δ, при независимом измерении переменных $f'(x)$ и x имеем

$$m_y^2 = \left(\frac{\partial \int_0^x f'(x)\,dx}{\partial x} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial \int_0^x f'(x)\,dx}{\partial f'(x)} \right)^2 m_{f'(x)}^2 \qquad (106)$$

или

$$m_y^2 = f'(x)^2 m_x^2 + x^2 m_{f'(x}^2, \qquad (107)$$

где m_{ϵ} и $m_{f'x}$ принимают максимальные значения при $f'(x) = \psi_{\max}$ и $x = x_{\max}$.

В соответствии с принципом равного влияния ошибок получим

$$\left.\begin{aligned} \psi_{\max} m_x &= \frac{\delta}{\sqrt{2}} \\ x_{\max} m_{f'(x)} &= \frac{\delta}{\sqrt{2}} \end{aligned}\right\}. \tag{108}$$

Ошибку $m_{f'x}$ измерения угла $f'(x)$ и пути m_x найдем из соотношений

$$m_x = \frac{\delta\rho''}{\sqrt{2}\,\psi''_{\max}}, \quad m''_{f'(x)} = \frac{\delta\rho''}{\sqrt{2}\,x_{\max}}. \tag{109}$$

Аналогично можно определить точность измерения угла $\varphi(x)$ и пути x в координатной плоскости zox.

Так как точность определения действительного отклонения от прямолинейности определяется точностью измерения углов $f'(x)$ и $\varphi'(x)$ и регистрации пути x, то допустимо дискретное измерение пути в пределах заданной точности. Поэтому для построения функциональной схемы прибора может быть применена одна из следующих формул

$$y_i(x) = k \sum_{t=0}^{t=t_s} \Delta y'_i(x) \frac{\Delta x}{\Delta t_i} \Delta t_i = k \sum_{t=0}^{t=t_s} \Delta y'_i(x)\, v_i\, \Delta t_i; \tag{110}$$

$$y_i(x) = k \sum_{i=1}^{i=\frac{s}{\Delta x}} \Delta y'_i(x)\, \Delta x, \tag{111}$$

где $y_i(x)$ — текущее отклонение от начального направления; $\Delta y'_i(x)$ — элементарный угол между касательной к базовой поверхности направляющей в плоскости xoy и осью ox; Δx — расстояние, на которое распространяется угол $\Delta y'_i(x)$; s — длина пути, на котором ведется процесс выверки направляющих; v_i — скорость движения прибора; k — параметр прибора.

Построение автоматического прибора в соответствии с формулой (104) предполагает использование датчиков пути, основанных на принципе непрерывного отсчета. Однако при выверке направляющих путей различной протяженности такие датчики существенно ограничивают возможности автоматического прибора, так как точность измерения пути находится в прямой зависимости от емкости датчика и в одних случаях эта емкость используется не полностью, а в других не обеспечивает необходимой разрешающей способности.

Если в основу работы автоматического прибора положить соотношение (110), то в этом случае точность определения отступлений от прямолинейности во многом зависит от степени постоянства скорости движения прибора v_i, так как процесс суммирования ведется по времени. Недостаточная стабильность скорости

движения прибора приведет к возникновению дополнительных ошибок.

От указанных недостатков свободна функциональная схема прибора, основанная на соотношении (111). Измерение пути осуществляется дискретно, а процесс суммирования элементарных отклонений от начального направления происходит вдоль пути, этим достигается независимость результатов измерения от скорости движения прибора.

Дискретное измерение пути можно производить, соблюдая соотношения (108). При этом точность регистрации пути практически не зависит от протяженности контролируемых направляющих ввиду того, что дискретные датчики могут быть основаны на принципе последовательного счета числа импульсов. Каждому отрезку направляющих путей соответствует строго определенное число импульсов, а сумма таких импульсов определяет общую длину проверяемого участка.

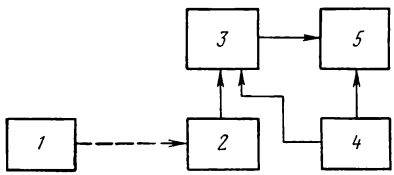


Рис. 92. Блок-схема автоматического прибора:

1 — лазер, *2* — угломерительная следящая система, *3* — интегратор, *4* — датчик пути, *5* — регистратор

Непрерывное измерение угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющих путей относительно референтной опорной линии может осуществляться фотоэлектрической угломерительной следящей системой.

Непосредственные отступления от прямолинейности определяются суммирующим устройством — интегратором, на вход которого поступают элементарные произведения величин $\Delta y_i'(x)\Delta x$ или $\Delta z_i'(x)\Delta x$, вырабатываемые множительным устройством. Для фиксирования результатов измерения могут применяться различные регистрирующие устройства, согласованные с интегратором преобразователями.

Таким образом, преимущество метода последовательного интегрирования заключается в независимости точности регистрации отклонений от прямолинейности и протяженности контролируемых направляющих путей и более рациональном использовании излучения осветительного устройства, задающего референтную опорную линию. На рис. 92 изображена блок-схема автоматического прибора для выверки направляющих путей в одной координатной плоскости (блок-схема для контроля направляющих путей по второй координате аналогична).

Лучом лазера, расходимость которого уменьшается коллимирующей оптической системой, задается проектное прямолинейное положение направляющей. Угломерительные следящие системы располагаются на подвижной каретке и при прокатывании каретки по направляющей осуществляют непрерывное измерение угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющей

от оси луча ОКГ. Полученная информация о величинах этих углов непрерывно вводится в число-импульсное интегрирующее фотоэлектрическое устройство, осуществляющее интегрирование указанных углов по пути. Выход интегратора подключен ко входу регистратора.

Экспериментальные исследования опытных устройств для контроля прямолинейности показали их высокую точность и производительность.

Средняя квадратическая ошибка в определении прямолинейности направляющих указанным методом составляет около 0,2 мм на каждые 100 м пути. Время, затраченное на выверку 100-метрового участка направляющих одновременно в плановой и высотной координатах составляет 10 мин [39].

В зависимости от производственной необходимости контроль за фактическим состоянием направляющих может осуществляться на всей длине направляющих или на отдельных участках. Если направляющие пути имеют геодезическую основу, выполненную в виде совокупности глубинных планово-высотных знаков, расположенных вдоль направляющих через каждые 50—100 м пути, то целесообразно при выверке направляющих осуществлять привязку начальной и конечной точек контролируемых участков направляющих к знакам базовой линии. Такая методика контроля дает возможность определять действительное положение отрезка направляющей относительно базовой линии. Определение действительных координат начальной и конечной точек контролируемого участка может осуществляться специальными контрольными жезлами от базовых знаков.

Практика выверки направляющих показала, что ошибка $m_{\text{п}}$ в определении координат точек направляющей от знака базовой линии с помощью жезла составляет в среднем 0,05 мм.

Величина этой ошибки складывается из ошибки центрирования на головку знака, ошибки контактирования с поверхностью направляющей, ошибки отсчета.

В то же время из большего числа экспериментальных исследований и производственных работ установлено, что средняя квадратическая ошибка m_{δ} установки реперных знаков в створ протяженностью до 1 км составит около 0,3 мм. Следовательно, минимальная величина средней квадратической ошибки, с которой может быть определено фактическое положение отдельных точек направляющих, расположенных напротив знаков базовой линии, относительно проектного прямолинейного положения составляет величину

$$m_g = \sqrt{m_{\text{п}}^2 + m_{\delta}^2 + m_{\text{о}}^2}, \qquad (112)$$

где $m_{\text{о}}$ — величина средней квадратической ошибки автоматического прибора, приведенная к середине отрезка.

Ошибка в определении прямолинейности направляющих с помощью автоматического прибора при передаче координат с конца одного отрезка на начало второго составит величину

$$m_u = m_g \sqrt{n}, \tag{113}$$

где n — число контролируемых отрезков.

При длине направляющих l и выбранной длине контролируемого отрезка b число отрезков $n = l/b$.

Следовательно,

$$m_u = m_g \sqrt{\frac{l}{b}}. \tag{114}$$

После привязки к начальным и конечным реперам базовой линии ошибка в середине хода составит величину

$$m_{u_{n/2}} = \frac{m_g}{2} \sqrt{\frac{l}{b}} \tag{115}$$

или

$$m_{u_{n/2}} = \frac{\sqrt{m_п^2 + m_\delta^2 + m_0^2}}{2} \sqrt{\frac{l}{b}}. \tag{116}$$

Рассмотрим на примере метода последовательного интегрирования принципы построения отдельных блоков автоматических устройств для контроля прямолинейности.

§ 27. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УГЛОМЕРНЫЕ СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ В ПРИБОРАХ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

Непрерывное измерение угловых отклонений точек базовой линии направляющей от опорной референтной прямой, согласно блок-схеме автоматического прибора, можно осуществлять фотоэлектрический углоизмерительный следящей системой (УСС).

Требуемую точность измерения угла $m_{f'x}$, как было показано в § 26, можно подсчитать по формуле

$$m_{f'(x)} = \frac{\delta\rho''}{\sqrt{2}\, x_{\max}}.$$

Так, для пути 50 м при средней квадратической ошибке измерения прямолинейности $m = 0{,}25$ мм требуемая точность измерения угла составит

$$m_\varphi = \frac{0{,}25 \cdot 206\,265''}{50 \cdot 10^3} \approx 1''.$$

Как видно из полученного результата, требуемые точности отслеживания угловых отклонений точек базовой линии направляющей от опорной линии достаточно высокие, поэтому при разработке автоматического прибора выбору следящей углоизмери-

тельной системы должно быть уделено особое внимание. В настоящее время известно большое количество фотоэлектрических угломерных устройств для автоматического визирования и слежения за заданным направлением.

В зависимости от характера использования излучения, несущего информацию об объекте исследования, структуры передающих и приемных устройств, построения блок-схемы углоизмерительные фотоэлектрические приборы можно классифицировать по определенным группам: работающие пассивным и активным методом, системы интенсивности без модуляции потока излучения и системы с модуляцией потока излучения и т. д. Наилучшими с точки зрения обеспечения заданной точности и помехозащищенности следует считать углоизмерительные устройства, основанные на активном методе работы с модуляцией потока излучения. Широкое применение в силу их сравнительной конструктивной простоты и достаточно высоких точностей измерения (до $1 \div 2''$) получили фотоэлектрические следящие системы с амплитудным и частотными анализаторами изображения. Эти углоизмерительные системы при определенных условиях могут быть применены в автоматическом приборе для контроля прямолинейности направляющих.

Автоматическое слежение за заданным референтным направлением при контроле прямолинейности решают комплексно все звенья фотоэлектрического углоизмерительного прибора: оптическое звено, анализатор изображения, приемник излучения и электромеханические звенья. Оптическое звено и анализатор изображения осуществляют первичную обработку принимаемой информации. Приемник лучистой энергии (ПЛЭ), являясь связующим звеном между оптической и электронными частями прибора, во многом определяет требованиям как к оптическим характеристикам системы (угол поля зрения, размеры входных и выходных зрачков, фокусные расстояния компонентов и т. д.), так и к электронным элементам.

Наибольший интерес, с точки зрения возможности их использования в автоматическом приборе для контроля прямолинейности, представляют германиевые и кремниевые фотодиоды и фототриоды. Они имеют малые габариты, низкие напряжения питания, достаточно высокую интегральную чувствительность и невысокий уровень шумов. Спектральная характеристика кремниевых фотодиодов хорошо согласуется с рабочей длиной волны газовых лазеров, работающих в видимой части спектра (0,6328 мкм), а германиевых — с инфракрасным излучением газовых ОКГ. Усредненные параметры германиевых и кремниевых фотоприемников приведены в табл. 6.

Оптическая схема углоизмерительного устройства должна обеспечивать при рациональных энергетических соотношениях необходимую точность слежения за заданным направлением. Фокусное расстояние объектива, его относительное отверстие,

Таблица 6

Параметры фотодиодов	Область спектральной чувствительности, мкм	Максимум спектральной чувствительности, мкм	Интегральная чувствительность, мА/лм	Темновой ток при мкА	Постоянная времени, с	Напряжение шумов, мВ	Размер чувствительной площадки, мм²
Германиевые	0,4 ÷ 1,8	0,86	10—400	30 ÷ 110	$3—5 \cdot 10^{-6}$	0,05—3,0	1 ÷ 5
Кремниевые	0,4 ÷ 1 2	1,5	3—200	1 ÷ 30	$3—5 \cdot 10^{-6}$	0,10—2,0	2 ÷ 70

поле зрения, диаметр входного зрачка и его конструкция в основном определяют аберрационные характеристики приемной части фотоэлектрического устройства и качество изображения в плоскости оптического анализатора.

Угловые рассогласования, возникающие на входе фотоэлектрической углоизмерительной системы, обычно измеряются оптическим или оптико-механическими компенсаторами, которые изменяют ход лучей, приходящих на анализатор изображения. Оптический компенсатор, являясь устройством сравнения в цепи обратной связи, кинематически связан с исполнительным органом фотоэлектрической следящей системы.

В фотоэлектрических устройствах используются различные типы компенсаторов: плоскопараллельная пластинка в сходящемся пучке лучей, два вращающихся клина в параллельном пучке лучей, клин в сходящемся пучке лучей, линзовые компенсаторы в сходящихся и параллельных пучках лучей, анализатор с микрометренным винтом и другие.

Были проведены исследования [32] основных типов компенсаторов, в результате которых получены их статические характеристики и коэффициент передачи, установлен диапазон линейности статической характеристики с допуском на нелинейность.

Для автоматической выверки прямолинейности направляющих перспективно использование углоизмерительных следящих систем с оптико-механическими компенсаторами, выполненными в виде плоскопараллельной пластинки. Этот вывод следует из учета таких свойств компенсатора, как достаточно линейная передаточная функция в пределах углов до 10°, возможность работы в сходящихся пучках лучей и сравнительная простота конструкции. Статическая характеристика компенсатора плоскопарал-

лельной пластинки в сходящихся пучках лучей может быть представлена выражением

$$\beta = \frac{d}{f'}\left[\sin(\alpha+\beta) - \frac{\sin 2(\alpha+\beta)}{2\sqrt{n^2-\sin^2(\alpha+\beta)}}\right]. \qquad (117)$$

Диапазон линейности статической характеристики с допуском на нелинейность составляет [125]

$$\Delta\beta_{лин} = \frac{n-1}{n}\left[\frac{6}{\frac{4}{n}-1-\frac{3}{n^3}}\right]^{1/3}\left(\frac{d}{f'}\right)^{2/3}\Delta\beta_{лин}^{1/3}. \qquad (118)$$

Коэффициент передачи k устанавливается соотношением

$$k = \frac{[n}{n-1}\frac{f'}{d} - 1. \qquad (119)$$

Обозначения в формулах: β — угол рассогласования на входе; α — угол поворота компенсатора; $k = \frac{\alpha}{\beta}$ — коэффициент передачи в линейной зоне; n — показатель преломления материала компенсатора; f' — фокусное расстояние объектива; d — толщина плоскопараллельной пластины; $\Delta\beta_{лин.}$ — ошибка нелинейности характеристики компенсатора в угле $\beta_{лин.}$. Ошибка вывода формулы (117) $\Delta\beta_м$ составляет [32]:

$\alpha°$	$\Delta\beta''_м$
1	0,06 d/f'
5	0,08 d/f'
10	0,7 d/f'

При разработке и создании угломерительных следящих систем заслуживает внимания вопрос об использовании в компенсаторах в качестве исполнительного элемента пьезокерамики [112].

Электрический сигнал, выделяемый приемником лучистой энергии, как правило, имеет мощность, недостаточную для управляющего воздействия. Поэтому задачей электронных звеньев следящей системы является его усиление до требуемой величины и преобразование в форму, удобную для управления. От качества согласования приемника лучистой энергии с электронной схемой во многом зависит чувствительность фотоэлектрической следящей системы. Параметры усилительных и управляющих элементов должны выбираться так, чтобы не создавать заметной составляющей шума и не вызывать нестабильности в работе угломерительной системы.

Несмотря на тщательную правку, направляющие не идеально прямолинейны, а представляют собой совокупность случайных искривлений, находящихся в пределах заданного допуска на отклонение от прямолинейности. Волнистую направляющую можно представить совокупностью отдельных кривых, у которых радиусы

кривизны колеблются в пределах от $\rho = \rho_{min}$ в точках перегиба до $\rho_{max} = \infty$ в точках сопряжения.

Величина ρ_{min} при заданной амплитуде и длине волны направляющей зависит от вида кривой. Так для синусоиды $y = a \sin 2\pi/l\, x$ в точках $x = \frac{nl}{4}$ (где $n = 1, 3, 5...$) $\rho_{min} = 1/4\pi^2 \times \times l^2/a$. Для дуги окружности большого радиуса $\rho_{min} = 1/32 \times \times l^2/a + a/2$.

Для большинства направляющих путей указанные искривления носят синусоидальный характер, обусловленный спецификой узлов закрепления направляющих. Они могут быть представлены в виде отдельных искривлений с разными амплитудами a и длинами волн l, у которых на длине $l/4$ радиусы кривизны изменяются в пределах от $\rho = \rho_{min}$ до $\rho_{max} = \infty$.

При расчете параметров углоизмерительных следящих систем необходимо учитывать характер искривления направляющих, поскольку динамика работы таких систем во многом определится фактическим состоянием направляющих.

Так, зная уравнение, описывающее характер искривления направляющих, можно получить зависимость, выражающую характер изменения углового рассогласования на входе УСС автоматического прибора

$$\dot{y}'(x) = \frac{dy(x)}{d(x)} = \frac{2\pi a}{l} \cos \frac{2\pi}{l} x. \qquad (120)$$

Выражение (120) может быть использовано при качественной оценке фотоэлектрических УСС путем определения возможных величин динамических ошибок.

Динамическая ошибка следящей системы обусловливается неточным воспроизведением управляющего воздействия на входе УСС. Исходя из характера управляющих воздействий на входе системы, можно рассчитать величину динамической ошибки фотоэлектрической углоизмерительной системы.

Величина динамической ошибки φ_g может быть представлена в виде уравнения, связывающего эту ошибку со входной величиной [14].

$$\varphi_g = W_\varphi(p)\, \beta(t), \qquad (121)$$

где $W_\varphi(p) = \frac{1}{1 + W(p)}$ — передаточная функция замкнутой системы; $W(p)$ — передаточная функция разомкнутой УСС; $\beta(t)$ — функция изменения угла рассогласования на входе системы.

Для установления вида передаточной функции $W(p)$ УСС представляют в виде звеньев направленного действия, обладающих свойством передачи только в одном направлении: от входа к выходу.

Для следящих систем, содержащих амплитудный анализатор, фазочувствительный модулятор, усилительный блок и исполни-

тельный электродвигатель с редуктором, передаточная функция $W(p)$ может быть записана в виде

$$W(p) = \frac{k_1 k_{дв}}{(1 + T_м p)\, p} = \frac{k}{(1 + T_м p)\, p}, \qquad (122)$$

где k_1 — передаточная функция последовательно включенных звеньев анализатора и фазочувствительного модулятора с фотоприемником усилителя; $k_{дв}$ — передаточный коэффициент исполнительного органа с редуктором; $T_м$ — электромеханическая постоянная времени двигателя.

С учетом (121) выражение для передаточной функции замкнутой системы примет вид

$$W_ф(p) = \frac{p + p^2 T_м}{k + p + p^2 T_м}. \qquad (123)$$

Для оценки возможной величины динамической ошибки УСС примем во внимание, что наиболее неблагоприятным вариантом для условий работы УСС является случай, когда амплитуды волн направляющих путей максимальны при минимальных длинах l этих волн.

Скорость изменения угла рассогласования на входе УСС можно определить путем дифференцирования уравнения (120) по времени

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{dy(x)}{dt} = \frac{dy(x)}{dx}\frac{dx}{dt} = -\frac{4\pi^2 a}{l^2}\sin\frac{2\pi}{l}xv, \qquad (124)$$

где v — скорость перемещения следящей системы вдоль направляющих путей.

Максимальная скорость изменения угла рассогласования на входе УСС будет наблюдаться в точках перегиба волн направляющих при $x = l/4$. Подставив значение x в (124), получим общий вид уравнения для максимальной скорости изменения угла рассогласования на входе УСС

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{dy(x)}{dt} = -\frac{4\pi^2 a}{l^2}v. \qquad (125)$$

Если для соседних участков реальных направляющих путей принять $a = 1{,}0$ мм, $l = 4{,}0$ м, а скорость перемещения следящей системы вдоль направляющих путей $v = 15$ см/с, то

$$\frac{dy(x)}{dt} = 0{,}38 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Если допустить, что нестабильность скорости движения автоматического прибора будет составлять 25%, то величина возможных ускорений в изменении угла рассогласования на входе УСС при принятых допущениях составит примерно $0{,}10 \cdot 10^{-3}$ рад/с^2.

Скорость и ускорение изменения угла рассогласования определяют величину [14]

$$\varphi_g = c_0\varepsilon(t) + c_1\dot{\varepsilon}(t)\dot{y}(t) + c_2\ddot{\varepsilon}(t)\ddot{y}(t) + \ldots \quad (126)$$

В общем виде $W(p)$ может быть записано как

$$W_\varphi(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \ldots + a_n p^n}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \ldots + b_m p^m}. \quad (127)$$

Расчет коэффициентов a_i, b_i, c_i ведется по формулам [14]

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= c_0 b_0 \\ a_1 &= c_0 b_1 + c_1 b_0 \\ a_2 &= c_0 b_2 + c_1 b_1 + c_2 b_0 \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_n &= c_0 b_n + c_1 b_{n-1} + \ldots + c_{n-1} b_1 + c_n b_0 \end{aligned}\right\}. \quad (128)$$

Сравнивая коэффициенты при p в выражении (123) и в (127), определим

$$a_0 = 0; \quad a_1 = 1; \quad a_2 = T_м; \quad b_0 = k; \quad b_1 = 1; \quad b_2 = T_м$$

$$c_0 = \frac{a_0}{b_0} = 0; \quad c_1 = \frac{a_1}{b_0} = \frac{1}{k}; \quad c_2 = \frac{a_2 - c_1 b_1}{b_0} = \frac{T_м - \frac{1}{k}}{k}.$$

С учетом полученных коэффициентов выражение для динамической ошибки примет вид

$$\varphi_{g_{max}} = \frac{1}{k}\dot{\varepsilon}_{max} + \frac{T_м k - 1}{k^2}\ddot{\varepsilon}_{max} = \frac{0{,}38 \cdot 10^{-3}}{k} + 0{,}10 \cdot 10^{-3}\,\frac{T_м k - 1}{k^2}. \quad (129)$$

Для фотоэлектрических УСС с оптико-механическими компенсаторами и усилителями мощности с двигателями типа ДИД-0,5 можно принять $k = 100$, $T_м = 0{,}08$ с. Подставив эти значения в (129), получим значение $\varphi_{g_{max}} = 0{,}38 \cdot 10^{-5}$ рад $\approx 1{,}0''$. Как видно из выполненных расчетов, современные технические средства обеспечивают требуемую точность измерения относительно опорной линии угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющих даже в случае их значительной по величине непрямолинейности.

Рассмотрим возможные для реализации схемы углоизмерительных систем и отдельных ее элементов.

На рис. 93 изображена общая функциональная схема приемной системы для выверки прямолинейности в одной координатной плоскости.

Она включает в себя объектив *1*, оптико-механический компенсатор *2*, разделительный блок *3*, отражающие пентапризмы *4*,

обтюратор *5*, две ромбические призмы *6*, приемник лучистой энергии *7*, источник подсветки *8*, конденсор *9*, приемник лучистой энергии *10*, электронные усилители *11*, *12*, исполнительный электродвигатель *13*, редуктор *14*, редуктор *15*, датчик пути *16*, блок

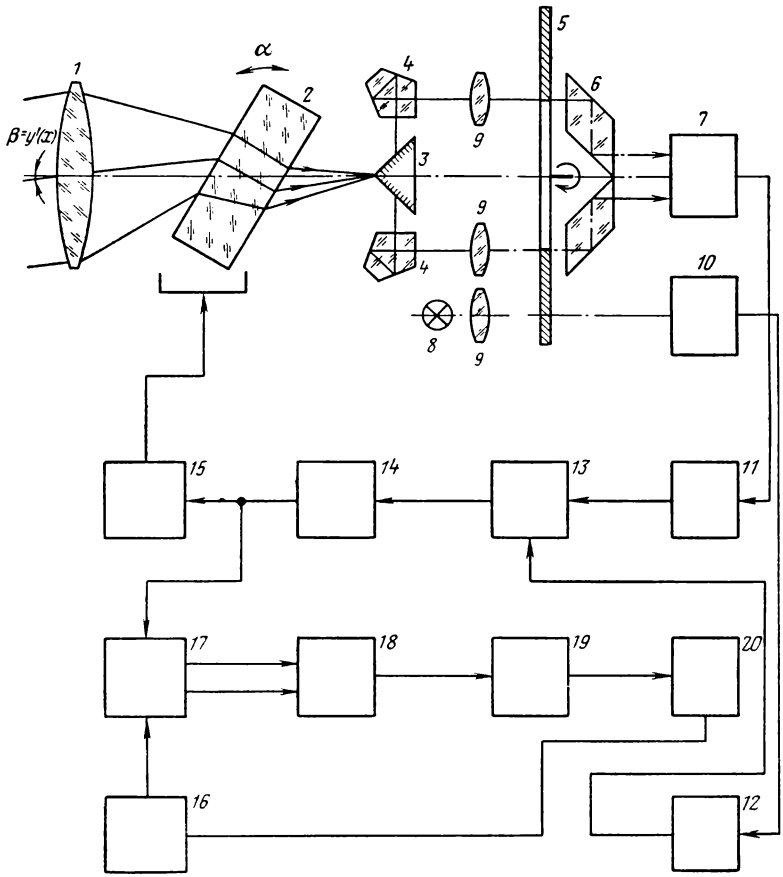


Рис. 93. Блок-схема следящей системы с анализатором в виде светоделительной призмы

разделения сигналов *17*, суммирующее устройство *18*, преобразователь *19* и регистрирующее устройство *20*.

Элементы *1—15* образуют углоизмерительную следящую систему, элементы *17—18* — интегрирующее устройство. Преобразователь *19* и регистратор *20* предназначены для записи результатов измерений. При появлении на входе следящей углоизмерительной системы углового рассогласования β между референтным опорным направлением, задаваемым потоком излучения ОКГ, и оптической осью приемной оптической системы происходит смещение кружка

рассеяния в фокальной плоскости объектива *1* с разделительной грани блока *3*. Величина этого углового рассогласования преобразовывается в разность световых потоков $\Phi_1 - \Phi_2$, направляемых пентапризмами *4* в сравнивающее устройство, обтюратор *5* которого поочередно модулирует их и осуществляет на фотоприемнике сравнение по амплитуде. На рис. 94 схематически показано взаимное расположение световых потоков Φ_1 и Φ_2 и растра об-

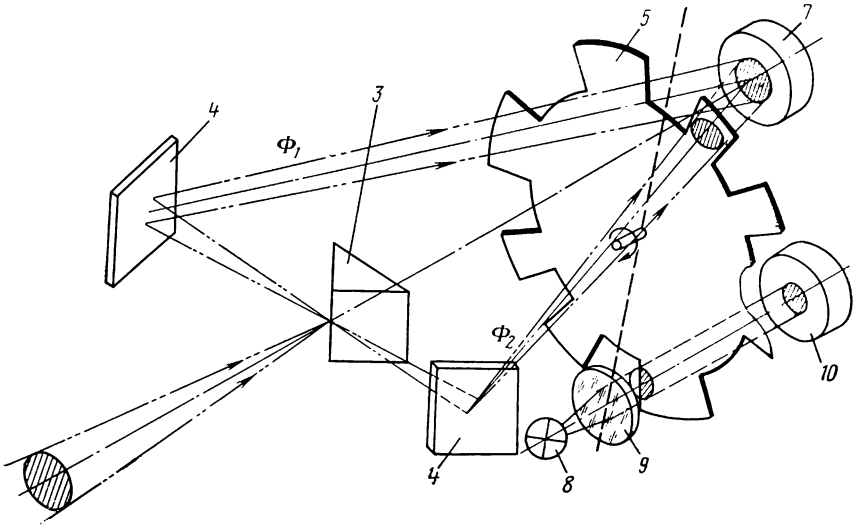


Рис. 94. Схема модуляции потока излучения

тюратора. Оно выбрано так, чтобы сигналы, снимаемые с фотоприемника *7* от каждого из двух модулируемых потоков, находились в противофазе. (Нумерация позиций на рис. 93 и 94 общая.)

В случае равенства световых потоков в обоих плечах сравнивающего устройства ($\Phi_1 = \Phi_2$) фотоприемник *7* оказывается засвеченным постоянным по величине световым потоком, равным $(\Phi_1 + \Phi_2)/2$, и электрический сигнал на входе его не содержит переменной составляющей. При наличии на входе системы углового рассогласования (того или иного знака) в электрическом сигнале снимаемом с фотоприемника *7* (см. рис. 93), появляется переменная составляющая (одной или другой фазы), амплитуда которой определяется величиной углового рассогласования. Для определения направления углового рассогласования используется опорный сигнал, задаваемый источником подсветки *8*, конденсором *9*, обтюратором *5* и фотоприемником *10*.

Взаимное расположение световых потоков Φ_1 и Φ_2 и светового потока Φ_3, используемого для получения опорного сигнала, относительно обтюратора обеспечивает сдвиг фазы опорного сигнала с фотоприемника 10 на $\frac{\pi}{2}$ по отношению к фазам сигнала

с фотоприемника *7*. Управляющий сигнал с фотоприемника *7* и опорный сигнал с фотоприемника *10* усиливаются электронными усилителями *11* и *12* и подаются на двухфазный асинхронный исполнительный электродвигатель *13*, выходной вал которого через редукторы *14* и *15* (см. рис. 93) кинематически связан с оптико-механическим компенсатором *2*. Обмотки исполнительного электродвигателя включены таким образом, чтобы при вращении

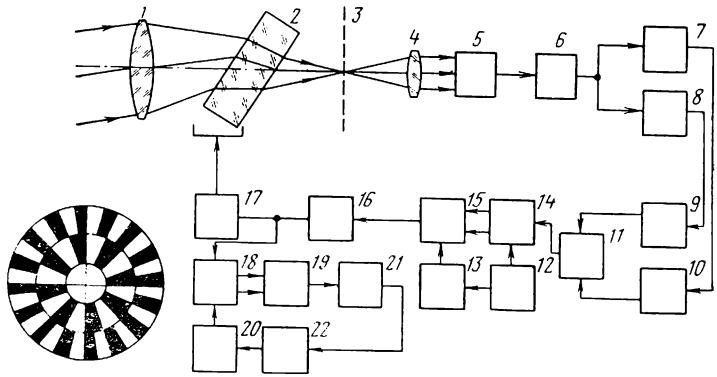


Рис. 95. Блок-схема следящей системы с частотным разделением сигнала

его вала поворот оптического компенсатора приводил к уравниванию амплитуд световых потоков Φ_1 и Φ_2.

На рис. 95 изображена функциональная схема приемной системы, в которой в качестве углоизмерительной следящей системы использована схема с частотным разделением сигналов.

Основными элементами такой УСС являются объектив *1*, оптико-механический компенсатор *2*, двухчастотный обтюратор *3*, конденсор *4*, приемник лучистой энергии *5*, электронный усилитель *6*, частотные фильтры *7*, *8*, выпрямительные мосты *9*, *10*, электронное реле *11*, генератор напряжения *12*, фазосдвигающее устройство *13*, электронный коммутатор *14*, двухфазный асинхронный электродвигатель *15*, редукторы *16* и *17*, интегрирующее и регистрирующее устройства *18—22*.

При нулевом рассогласовании на входе следящей системы и определенном положении оптико-механического компенсатора излучения ОКГ собирается в фокальной плоскости объектива таким образом, чтобы кружок рассеяния точно располагался на границе раздела двух концентрических поясов с прозрачными и непрозрачными полосами. Число полос в каждом поясе различно и выбирается так, чтобы при вращении модулятора лучистый поток модулировался двумя частотами f_1 и f_2.

При угловом повороте приемной системы относительно лазерного луча из-за отклонений контролируемого участка направляющих

от прямолинейности происходит смещение кружка рассеяния с границы раздела указанных поясов и лучистый поток модулируется с частотой f_1 или f_2 в зависимости от того, на каком из двух поясов находится в данный момент кружок рассеяния. Соответствующую частоту имеет и пульсация тока в цепи приемника лучистой энергии.

Сигналы с фотоприемника усиливаются электронным усилителем *6* и поступают на два фильтра *7* и *8*, построенные соответственно на частоты f_1 и f_2.

Электронное реле *11*, управляемое разностным напряжением с выходом двух выпрямителей *9*, *10*, с помощью электронного коммутатора *14* обеспечивает подачу напряжения от питающего генератора напряжения *12* на управляющие обмотки исполнительного электродвигателя *15*. Напряжение на обмотку возбуждения исполнительного электродвигателя поступает от генератора напряжения *12* через фазосдвигающее устройство *13*.

Обмотки исполнительного электродвигателя включаются так, чтобы при вращении его выходного вала оптико-механический компенсатор *2* приводил кружок рассеяния на границу раздела двух поясов модулирующего диска. Величина угла поворота оптико-механического компенсатора вводится в интегрирующее устройство *18—19*, где с учетом сигналов с датчика пути *20* вычисляются отклонения направляющих от прямолинейности.

Запись результатов измерения осуществляется регистрирующим прибором *22*.

Можно в качестве обтюратора в УСС использовать диск, у которого растр состоит из трех концентрических поясов с равным количеством прозрачных и непрозрачных полос, но сдвинутых друг относительно друга. Обеспечивая высокую точность слежения за заданным направлением, описанные углоизмерительные системы сложны по своей структуре, их оптические схемы чувствительны к разъюстировкам. Исследования, выполненные в МИИГАиК [40], позволили разработать следящую систему с относительно несложной конструктивной схемой при сохранении высоких точностных параметров системы. В такой фотоэлектрической следящей системе отсутствуют элементы, формирующие канал опорного сигнала; она обладает высокой помехозащищенностью.

Необходимым условием работоспособности системы является модуляция потока излучения, причем модуляция с заданной частотой может осуществляться как внутри угломерной системы в промежутке между объективом и амплитудным анализатором, так и вне системы — у источника излучения.

Блок-схема такой следящей системы показана на рис. 96. Она содержит объектив *1*, оптико-механический компенсатор *2*, светоделительную призму *4*, два фотоприемника *3*, *5*, предусилители *6*, *7*, электронное устройство *8* выделения мгновенной суммы и разности сигналов, усилители *9*, *10* разности и суммы сигналов,

исполнительный электродвигатель *14*, схему *11* (выпрямитель) для регулировки коэффициента усиления усилителей. Электронное устройство *8* выделения мгновенной суммы и разности сигналов выполнено таким образом, что фаза и величина разностного сигнала изменяется в зависимости от величины углового рассогласования на входе следящей системы.

На два входа устройства *8* подаются сигналы от фотоприемников *3*, *5*, а с выходов его сумма и разность сигналов соответствующей фазы подается на усилители разности и суммы сигналов

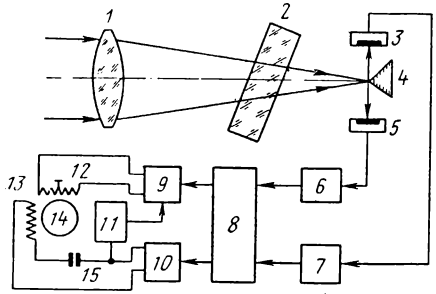


Рис. 96. Блок-схема следящей системы без опорного канала

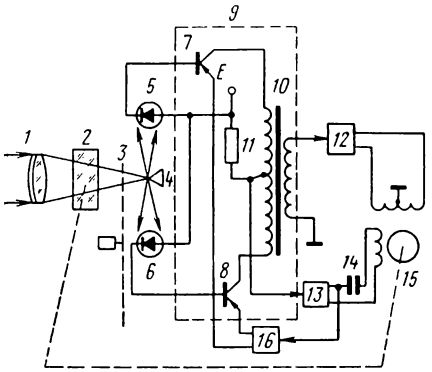


Рис. 97. Схема выделения суммы и разности сигналов

соответственно, причем выходы их подключены к обмоткам управления *12* и через фазосдвигающую емкость *15* к обмотке возбуждения *13* двухфазного асинхронного электродвигателя. Электродвигатель *14* через кинематическую цепь осуществляет поворот оптико-механического компенсатора *2* пропорционально величине и направлению углового рассогласования.

С целью устранения влияния изменения мощности источника излучения на точность работы угломерной следящей системы выход усилителя *10* суммы сигналов через выпрямитель *11* соединен с регулирующими элементами усилителя *9*, которые изменяют коэффициент усиления обратно пропорционально величине суммы сигналов.

Практическая схема реализации устройства для выделения мгновенной суммы и разности сигналов, осуществляющая изменение величины и фазы разностного сигнала в зависимости от величины углового рассогласования на входе угломерной системы, показана на рис. 97. Световой пучок оптическими элементами *1—4* системы направляется на фотоприемники *5*, *6* (фотодиоды), включенные в базовые цепи транзисторов *7*, *8*. Коллекторы их включены на первичную обмотку трансформатора *10*. Средняя точка первичной обмотки через резистор *11* подключена к источнику питания.

Разностный сигнал соответствующей фазы снимается с вторичной обмотки трансформатора, а суммарный сигнал — с резистора *11*.

Вторичная обмотка трансформатора включена на вход усилителя управления *12*, а средняя точка первичной обмотки подключена ко входу усилителя возбуждения *13*. Выход усилителя *13* подключен к обмотке возбуждения исполнительного электродвигателя *15* через фазосдвигающий конденсатор *14* и к выходу устройства *16* управления коэффициентом усиления электронного преобразователя сигналов *9*.

§ 28. ЧИСЛО-ИМПУЛЬСНЫЕ ИНТЕГРАТОРЫ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

Основные требования к точности измерения пути при контроле прямолинейности были установлены в § 27. Допустимая ошибка в измерении пути определяется из соотношения

$$m_x = \frac{\delta\rho''}{\sqrt{2}\,\psi_{max}}.$$

Если принять $\psi_{max} = 600''$, а $\delta = 0{,}25$ мм, то m_x окажется равно примерно 60 мм. Из расчета видно, что требуемая точность измерения пути составляет примерно 1,5/1000. Такую точность могут обеспечить датчики пути с дискретной формой отсчета. Выработка импульсов, соответствующих пройденному пути, может осуществляться как фотоэлектрическими, так и индукционными, электромагнитными или электромеханическими устройствами. Датчики пути могут располагаться непосредственно на контролируемой направляющей или на самом приборе.

Выбор датчика пути следует производить исходя из требуемых точностей регистрации отклонений направляющих от прямолинейности и конструктивных особенностей направляющих.

Для воспроизведения математических операций интегрирования можно использовать устройства, основанные на механическом, электромеханическом и электронном принципах. Недостатками механических интеграторов основанных на базе фрикционных механизмов, с переменным передаточным числом являются их значительная инерционность, ошибки интегрирования, вызванную погрешностью в угловой скорости дисков и погрешностью в изготовлении диаметров съемных валиков и проскальзывания в передачи, трения.

Электромеханические интегрирующие устройства построены на основе использования дифференцирующих свойств тахогенератора, процесс интегрирования в которых осуществляется по входной величине, изменяющейся во времени. Это обстоятельство затрудняет их применение для определения величины отклонения направляющих от прямолинейности, так как требует введения в конструкцию прибора устройств для стабилизации скорости его движения. Электрические интегрирующие устройства на основе

RC цепей обладают сравнительной низкой точностью производства операций интегрирования. Поэтому во многих интегрирующих схемах они применяются совместно с операционными усилителями постоянного тока, однако последние требуют в свою очередь осуществления определенных мер по компенсации «дрейфа» нуля усилителя.

Повышение точности и стабильности интегрирования можно достичь путем применения устройств, основанных на число-импульсном принципе [120]. Этот метод интегрирования может быть использован в автоматическом приборе для контроля прямолинейности, так как погрешность такого интегратора мала и определяется в основном выбором цены деления одного импульса и надежностью элементов число-импульсной схемы.

Принцип его действия основан на том, что интервалы между сигналами, поступающими от углоизмерительной системы, заполняются пачками импульсов, количество которых генерируется пропорционально пути, проходимому автоматическим прибором, а суммирование этих пачек импульсов N_1 и N_2 осуществляется дифференциальными электромеханическими счетчиками.

Датчик пути генерирует определенное число импульсов на единицу пути; датчик угла УСС вырабатывает сигналы, длительность которых пропорциональна величинам $+y'(x)$ и $-y'(x)$.

В схеме разделения происходит перемножение импульсов Δx на $+y'(x)$ и на $-y'(x)$. На выходе схемы разделения образуются две серии импульсов. Число импульсов в каждой серии пропорционально произведениям величин $+y'(x)\,\Delta x$ и $-y'(x)\Delta x$. Таким образом, значения величин углового отклонения точек базовой линии направляющей от референтной опорной прямой преобразуется схемой разделения интегратора в величины относительной разности числа импульсов двух серий N_1 и N_2, заполняющих интервалы между сигналами от углоизмерительной следящей системы и вводимых в интегрирующее устройство.

При этом

$$y'(x) = k\,\frac{N_1 - N_2}{N}, \tag{130}$$

где

$$N = N_1 + N_2, \tag{131}$$

k — постоянный коэффициент.

Значения $y'(x)$ определяются дискретно и изменяются с переходом импульсов из одной серии в другую [120].

$$\Delta y'(x) = k\left[\frac{(N_1+1)-(N_2-1)}{N} - \frac{N_1 - N_2}{N}\right] = \frac{2k}{N}. \tag{132}$$

Указанные серии импульсов последовательно поступают на суммирующее устройство, производящее их алгебраическое сложение и тем самым суммирующее поперечные отклонения направляющих от прямолинейности.

Перемножение и разделение импульсов от УСС и датчика пути на две серии $+y'(x)\,\Delta x$ и $-y'(x)\,\Delta x$ может быть осуществлено фотоэлектрическим устройством, изображенным на рис. 98, с помощью электронной схемы управления, представленной на рис. 99.

На рис. 98 показаны датчик пути, разделительное устройство и элементы углоизмерительной следящей системы: исполнительный электродвигатель *9*, редуктор *8* и оптико-механический компенсатор *7*.

Ролик *14* датчика пути катится по контролируемой направляющей и приводит во вращение модулирующий обтюратор *3*, периодически прерывающий световой поток от неподвижного источника подсветки *13*, свет от которого через гребенку *10* попадает на неподвижный фотоприемник *11*. Количество импульсов, снимаемых с фотоприемника *11*, пропорционально пути, проходимому измерительной приемной системой. Каждый отдельный импульс соответствует расстоянию Δx.

Подвижный источник подсветки *1* жестко укреплен на оси обтюратора *3* и расположен таким образом, что свет от него через конденсор *2* проектируется на щель *4*, расположенную по радиусу обтюратора *3*. При вращении обтюратора *3* свет через щель *4* последовательно попадает на подвижный *5* и неподвижный *12* фотоприемники.

Если фотоприемники *5* и *12* расположены диаметрально противоположно, то в промежутки между следующими друг за другом импульсами с фотоприемников *5* и *12*, с фотоприемника *11* снимается строго определенное и равное количество импульсов. Угловое рассогласование, поступившее на вход углоизмерительной следящей системы, приводит к перемещению от электродвигателя *9* водила *8*. При этом подвижный фотоприемник *5* по дуге окружности смещается на определенный угол. Величина этого угла соответствует величине углового рассогласования $y'(x)$, поступившего на вход системы. В этом случае количество импульсов, снимаемых с фотоприемника *11* за время между следованием импульсов с фотоприемников *12*, *5* и *5*, *12* оказывается различным в двух рассматриваемых полупериодах. В интервал времени между импульсами с фотоприемников *12*, *5* укладывается N_1 импульсов с фотоприемника *11*, а в интервал времени между последующими импульсами с фотоприемников *5*, *12* — N_2 импульсов.

Импульсы с фотоприемников *5*, *11*, *12* поступают соответственно на входы Bx_1, Bx_3 и Bx_2 электронных усилителей (см. рис. 99), где они усиливаются и подаются далее на схему управления.

Схема управления включает в себя триггер *Тр* с раздельными входами и электронные ключи *К1* и *К2*. Электронные ключи *К1* и *К2* являются логическими элементами типа *И* и могут быть выполнены на полупроводниковых транзисторах или диодах.

Принцип работы схемы управления показан на временной диаграмме на рис. 100. Импульсы с фотоприемников *5* и *12*

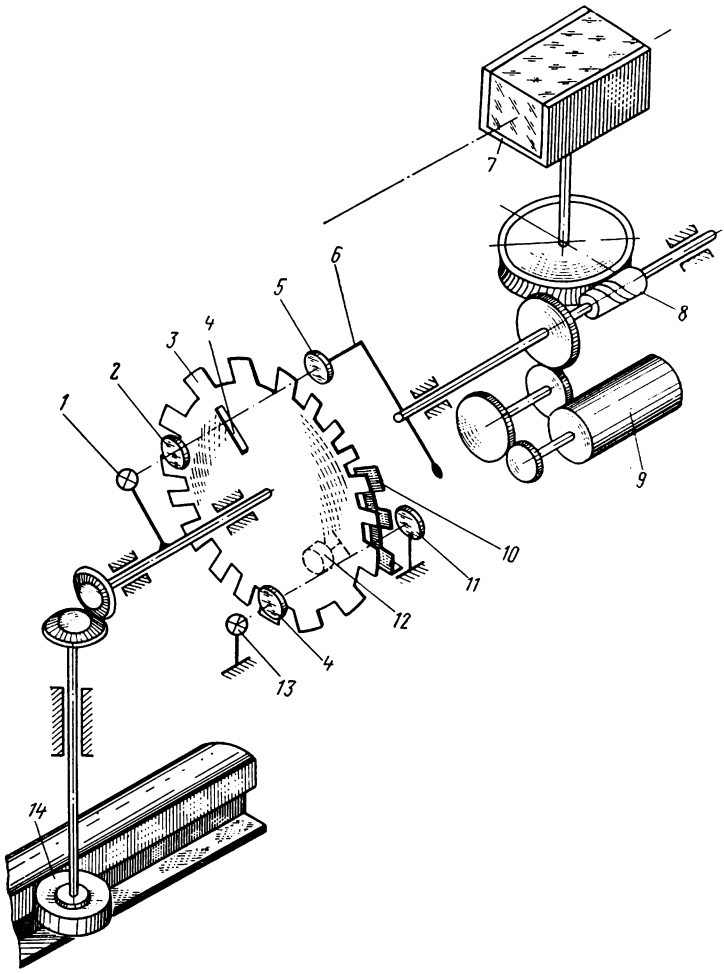


Рис. 98. Фотоэлектрическое устройство число-импульсного интегратора

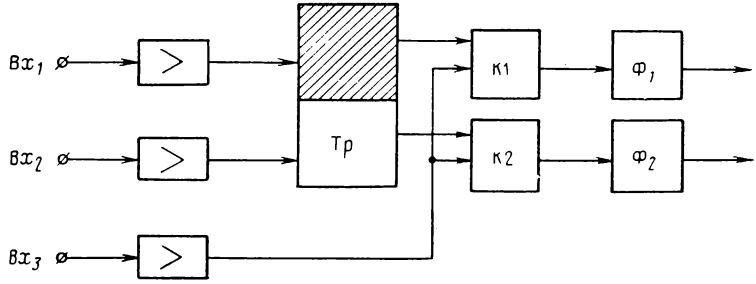


Рис. 99. Схема управления число-импульсного интегратора

(см. рис. 98) последовательно поступают на входы триггера *Тр* и перебрасывают его в одно из двух устойчивых состояний. Входы ключей *К1* и *К2* подключены к противоположным выходам триггера, поэтому в промежуток времени, в течение которого на оба входа ключа *К1* (или ключа *К2*) от триггера *Тр* и от фотоприемника *11*

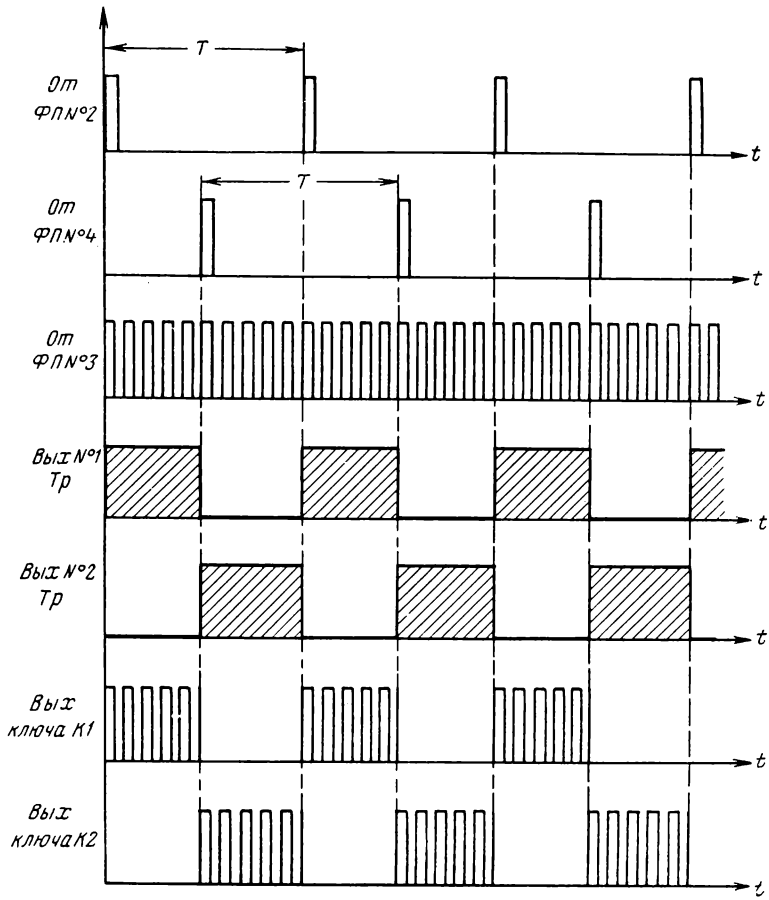


Рис. 100. Диаграмма работы схемы управления

поступают импульсы одной полярности, ключ открыт и пропускает импульсы от фотоприемника *11* на формирователь импульсов Ф1 (или Ф2). С приходом следующего импульса на один из входов триггера последний перебрасывается в противоположное состояние, что вызывает запирание ранее открытого ключа и открывание второго.

Рассмотренная комбинация элементов позволяет произвести перемножение величин $\pm y'(x)$ и Δx и представить произведения

величин $+y'(x)\,\Delta x$ и $-y'(x)\,\Delta x$ в виде пачек импульсов. Поскольку время пребывания триггера в каждом из устойчивых состояний меняется в зависимости от величины углового рассогласования на входе следящей системы, то соответственно меняется и длительность пачек импульсов N_1 и N_2, последовательно поступающих через формирователи Φ_1 и Φ_2 на суммирующее устройство.

Ошибка в определении $\beta = y'(x)$ вследствие дискретности счета определится из выражения [120]

$$\delta y'(x) \leqslant \frac{1}{2}\,\Delta y'(x) = \frac{k_1}{N}, \tag{133}$$

где k_1 — постоянный коэффициент,

$$N = N_1 + N_2.$$

С учетом соотношения (133) необходимое число импульсов N в соответствии с требуемой точностью определения можно подсчитать из соотношения

$$N \geqslant \frac{k_1}{\delta y'(x)}. \tag{134}$$

Подсчитаем требуемые точности работы схемы число-импульсного интегратора. Средняя квадратическая ошибка в определении отступлений направляющих от прямолинейности складывается из систематической и случайной ошибок

$$\delta y_i(x) = \delta y_i(x)_{\text{сист}} + \delta y_i(x)_{\text{случ}}. \tag{135}$$

Систематическая ошибка в работе схемы число-импульсного интегратора может быть учтена при обработке результатов измерения.

Случайная ошибка в работе число-импульсного интегратора возникает из-за погрешностей в определении угловых отклонений точек базовых поверхностей направляющих от референтной опорной прямой, погрешностей число-импульсных преобразующих устройств и ошибок суммирующих устройств.

Для установления закона накопления случайных ошибок в работе схемы число-импульсного интегратора воспользуемся основным выражением, реализуемом в схеме прибора [37].

$$y_i(x) = \sum_{i=1}^{i=\frac{S}{\Delta x}} \Delta y_i'(x)\,\Delta x.$$

Предположим, что накопление случайных ошибок в показаниях прибора осуществляется дискретно на каждом отрезке пути Δx, тогда по теории ошибок имеет [10]

$$\delta y_i(x)_{\text{сл}} = \sqrt{\delta^2 y_1(\Delta x) + \delta^2 y_2(\Delta x) + \ldots + \delta^2 y_n(\Delta x)}. \tag{136}$$

Если принять, что

$$\delta y_1(\Delta x) = \delta y_2(\Delta x) = \ldots = \delta y_n(\Delta x),$$

то выражение (136) примет вид

$$\delta y_i(x_{сл}) = \delta y_i(\Delta x)\sqrt{n}. \tag{137}$$

Но $n = \frac{s}{\Delta x}$. После подстановки значения n в (137) окончательно имеем

$$\delta y_i(x)_{сл} = \delta y_i(\Delta x)\sqrt{\frac{s}{\Delta x}}. \tag{138}$$

Если предположить, что один импульс от датчика пути соответствует расстоянию $\Delta x/p$ (p — число импульсов от датчика пути, соответствующее расстоянию Δx), а случайная ошибка в работе схемы число-импульсного интегратора обусловливается пропаданием импульсов в моменты переключения управляющих элементов схемы через каждые σ импульсов, то с учетом сделанных предположений выражение (138) примет вид

$$\delta y_i(x)_{сл} = \delta y_i\left(\frac{\Delta x\sigma}{p}\right)\sqrt{\frac{s}{\frac{\Delta x}{p}\sigma}}. \tag{139}$$

Обозначив $\frac{\Delta x\sigma}{p} = q$, окончательно имеем

$$\delta y_i(x)_{сл} = \delta y_i(q)\sqrt{\frac{s}{q}}. \tag{140}$$

Полученная формула позволяет установить требования к точности работы число-импульсной схемы интегратора.

Так, если принять, что общее количество импульсов N в двух пачках N_1 и N_2 составляет 100, а переключение управляющих элементов число-импульсной схемы происходит в среднем через каждые 50 импульсов с потерей в момент переключения одного импульса, то при скорости движения автоматического прибора 15 см/с и частоте следования импульсов от датчика пути 400 Гц для среднего пути интегрирования 50 м при средней квадратической ошибке измерения прямолинейности направляющих 0,25 мм допустимая случайная ошибка число-импульсной схемы интегратора на отрезке пути q должна составлять величину

$$\delta y_i(q) = 0{,}005 \text{ мм}.$$

Подсчитаем отрезок q, соответствующий σ импульсам от датчика пути с ценой значения каждого импульса $\Delta x/p$,

$$q = \frac{150 \text{ мм} \cdot 50}{400} = 18{,}75 \text{ мм}.$$

Таким образом, для обеспечения точности определения прямолинейности направляющих 0,25 мм на среднем пути интегрирова-

ния 50 м случайная средняя квадратическая ошибка интегратора не должна превышать 0,005 мм на пути в 18,75 мм. Эти величины соответствуют погрешности число-импульсной схемы в 2% и относительной ошибке интегратора 0,00030.

Конечным звеном интегратора является суммирующее устройство. Оно должно удовлетворять определенным требованиям в отношении точности отработки поступающих на его вход сигналов, обладать высокой надежностью, содержать, по возможности, небольшое число элементов и хорошо согласовываться с остальными звеньями автоматического прибора.

В качестве суммирующего устройства можно использовать реверсивный шаговый электродвигатель или реверсивный числовой счетчик.

В общем случае шаговый двигатель совместно с управляющим электронным коммутатором можно рассматривать как систему частотного регулирования синхронного двигателя с возможностью фиксации углового положения ротора [84].

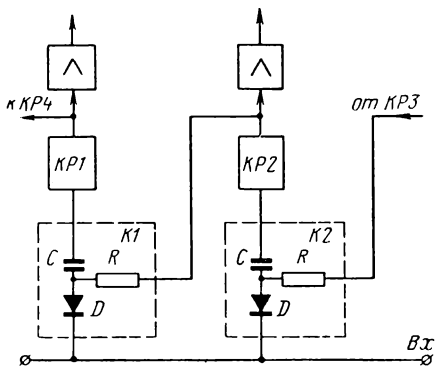


Рис. 101. Схема управления шаговым двигателем

При подаче на один из двух входов блока управления шаговым двигателем (ШДР) пачки импульсов ротор последнего поворачивается на определенный угол, соответствующий числу импульсов в пачке. При приходе следующей пачки импульсов на второй вход блока управления ШДР ротор его поворачивается в обратную сторону на угол, соответствующий новому числу импульсов в пачке. Разность углов поворота выходного вала (ротора, ШДР от двух пачек импульсов) определяет в нашем случае величину отклонения данного участка контролируемой направляющей от прямолинейности.

На рис. 101 изображена функциональная схема управления 4-х фазным шаговым реверсивным двигателем (для случая работы без реверса), разработанная и составленная на основании проведенных исследований и в соответствии с рекомендациями, приводимыми в [84].

Она включает в себя электронные ключи *К1—К4* (*К3* и *К4* на рисунке не показаны), кольцевые регистры *КР*, образующие кольцевой счетчик, и усилители мощности. Эту схему можно считать типовой для реверсивных шаговых двигателей с четырьмя обмотками, управление которыми осуществляется импульсами со скважностью, равной двум, а период их равен четырем периодам управляющей частоты. В исходном состоянии (в отсутствие импульсов

на входной шине *Вх*) потенциалы выходов кольцевых регистров распределены таким образом, что два рядом расположенных выхода оказываются с одинаковым высоким 0 или низким *1* потенциалом. Пусть это распределение оказалось равным 0011, тогда для импульсов пачки, приходящей на вход схемы, ключи *К2* и *К3* оказываются открытыми, а ключи *К1* и *К4* закрытым. От первого импульса пачки, прошедшего через ключи *К2* и *К3*, кольцевой регистр *КР2* перейдет из *0* в *1* и вызовет переход кольцевого регистра *КР4* из *1* в *0*, а кольцевые регистры *КР1* и *КР3* подтвердят свое состояние. При этом изменившимися потенциалами на выходах *КР2* и *КР4* закроется ключ *К3* и откроется *К1*, а ключи *К2* и *К4* окажутся в прежних состояниях. Приход следующего импульса из пачки вызовет переход регистра *КР1* из *0* в *1*, а он в свою очередь переведет *КР3* из *1* в *0*. Регистры *КР2* и *КР4* сохранят при этом свои состояния, вследствие чего ключи *К1* и *К4* окажутся для следующего приходящего импульса пачки открытыми, а *К2* и *К3* — закрытыми и т. д. Такая последовательность работы схемы блока управления ШДР приводит к тому, что с выхода усилителей мощности на обмотки управления ШДР поступают импульсы в строго определенной последовательности, а каждые два рядом следующих импульса сдвинуты по фазе друг относительно друга на $\frac{\pi}{2}$.

Для обеспечения реверса функциональная схема блока управления ШДР должна содержать две входные шины, а их связь с кольцевыми регистрами осуществляться через ключи. Кольцевой счетчик может быть выполнен на полупроводниковых транзисторах или динисторах, а электронные ключи составлены из полупроводниковых элементов.

Рассмотренные 4-тактные схемы управления ШДР могут быть преобразованы в восьмитактные путем добавления еще четырех ключей и четырех кольцевых регистров. Такое преобразование в два раза сокращает шаг, в два раза увеличивает приемность двигателя и способствует наиболее высоким показателям работы шагового двигателя.

Можно построить такую схему число-импульсного интегратора, в которой на входы суммирующего устройства интегратора подаются не последовательные пачки импульсов N_1 и N_2, а их разность $N_1 - N_2$, образуемая в электронной схеме управления. При этом, если $N_1 - N_2 > 0$, то эта серия импульсов поступает на блок управления ШДР по первому входу, если $N_1 - N_2 < 0$, то по второму. Такой режим работы ШДР является наиболее предпочтительным, так как колебательные движения ротора ШДР не возникают.

Фотоэлектрическое устройство, реализующее такой принцип измерения, показано на рис. 102; оно отличается от рассмотренного ранее аналогичного устройства (см. рис. 98) только наличием дополнительного неподвижного фотоприемника *15*, установленного

диаметрально противоположно фотоприемнику *12*, и более длинной щелью *4* обтюратора. Длина щели *4* (вдоль радиуса) должна быть такой, чтобы при вращении обтюратора *3* свет от лампочки накаливания *1* через щель мог засвечивать последовательно все три фотоприемника — *12*, *5* и *15*.

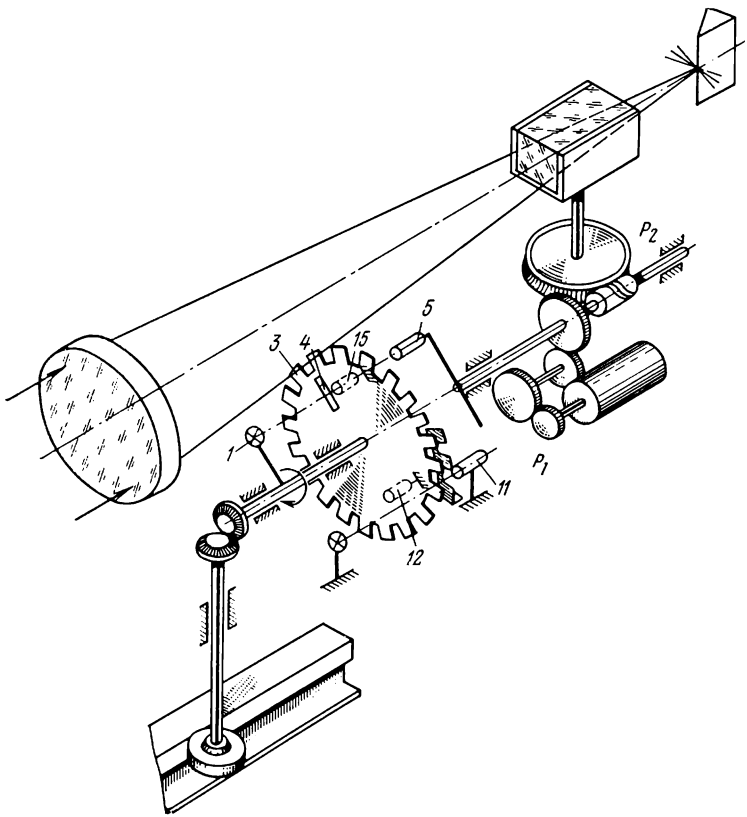


Рис. 102. Фотоэлектрическое устройство число-импульсного интегратора с разностной схемой управления

Блок-схема разностной схемы управления (рис. 103) содержит два триггера *Тр1* и *Тр2*, два электронных ключа *К1* и *К2* и устройство установки 0 триггеров. Триггер *Тр1* управляется импульсами, последовательно поступающими с фотоприемников *3* и *9*, а триггер *Тр2* — импульсами с фотоприемников *3* и *15* (см. рис. 102).

Ключи *К1* и *К2* управляются триггерами *Тр1* и *Тр2* таким образом, что если на выходах обоих триггеров высокий потенциал, то открыт ключ *К1*, а *К2* закрыт; если на выходах обоих триггеров низкий потенциал, то открыт ключ *К2*, а ключ *К1* закрыт. На входы ключей *К1* и *К2* подаются также импульсы от датчика пути, которые пройдя соответствующий ключ, поступают на один или второй вход схемы блока управления ШДР.

Перед началом измерений с помощью устройства установки 0 триггеры *Тр1* и *Тр2* устанавливаются в такие положения, чтобы на их выходах (у каждого триггера используется только по одному выходу) были противоположные по величине потенциалы — высокий у триггера *Тр2* и низкий у триггера *Тр1*.

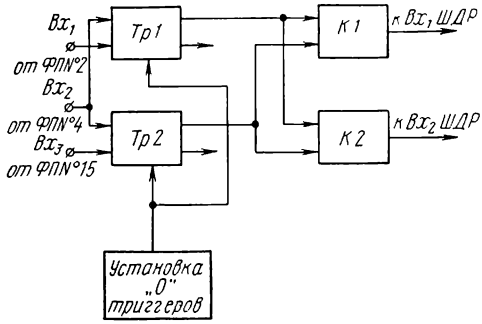


Рис. 103. Разностная схема управления

Время пребывания триггера *Тр1* в каждом из устойчивых состояний определяется угловым положением подвижного фотоприемника *3* (см. рис. 102) по отношению к неподвижному фотоприемнику *9*. Триггер *Тр2* за один оборот обтюратора также дважды изменяет свое состояние, через каждые пол-оборота. Это приводит к тому, что при наличии рассогласования на входе углоизмерительной следящей системы за время одного оборота обтюратора *10* появляется некоторый интервал времени, где потенциалы на выходах триггеров *Тр1* и *Тр2* совпадают по знаку. Если совпадение происходит по высокому потенциалу, то в этот промежуток времени открыт ключ *К1*, если по низкому потенциалу, то ключ *К2*. Количество импульсов от датчика пути, укладывающееся в каждый из указанных интервалов соответствует разности $N_1 - N_2$. Временная диаграмма работы такого число-импульсного интегратора приведена на рис. 104.

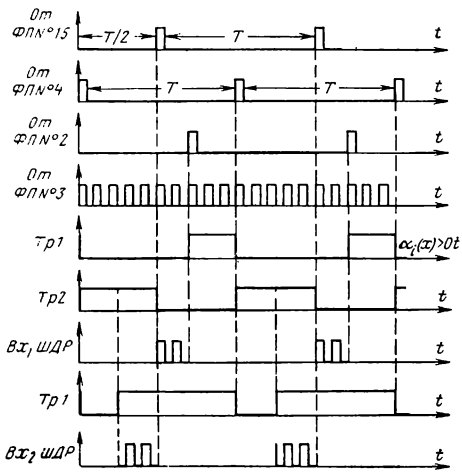


Рис. 104. Временная диаграмма

Конечным звеном автоматического прибора для контроля прямолинейности является регистрирующее устройство. В зависимости от типа регистрирующего устройства запись результатов измерения может производиться на масштабной ленте непрерывно или дискретно, в виде отдельных линий и точек или в цифровой форме и т. д. Для расшифровки записи результатов измерения необходимо либо вводить в записывающее устройство масштабные отметки с датчика пути, либо синхронизировать движение ленты

регистрирующего устройства с последовательностью сигналов, вырабатываемых датчиком пути. Класс точности регистрирующего устройства и его тип следует выбирать исходя из необходимого диапазона регистрируемых величин и требуемой точности измерения.

Если результаты измерений непрямолинейности направляющих записывают самописцем чернилами в виде непрерывной линии на масштабной ленте в том или ином масштабе, то они подлежат дальнейшей обработке и это требует определенных затрат времени.

С целью автоматизации процесса обработки результатов измерения их удобно получать на ленте в цифровой форме. Для этого в качестве регистрирующего устройства можно использовать быстродействующие 3-канальные цифровые вольтметры, содержащие цифропечатающее устройство. Два из его каналов могут использоваться для ведения записи отклонений направляющих от прямолинейности одновременно в плане и по высоте, а третий общий канал использоваться для цифровых масштабных отметок на ленте с целью синхронизации проходимого прибором пути с сигналами от датчика пути.

§ 29. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ, ОСНОВАННЫХ НА СПОСОБЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Автоматический прибор для высокоточной двухкоординатной выверки прямолинейности направляющих должен содержать два основных устройства — передающее и приемное. Назначением передающего устройства является создание в пространстве вдоль выверяемой направляющей референтной опорной линии, задающей прямолинейность. Поскольку контроль прямолинейности необходимо осуществлять одновременно в двух координатах (в плане и по высоте), параметры передающего устройства должны выбираться с учетом этого требования, обеспечивать фиксацию направления референтной опорной линии в пространстве и позволять осуществлять измерения прямолинейности направляющих с необходимой точностью.

Построение конструктивной схемы передающего устройства во многом определяет конструктивную схему приемного устройства.

Рассмотрим возможные варианты конструктивных схем передающих и приемных устройств.

С целью обеспечения одновременной выверки прямолинейности по двум координатам излучение ОКГ после коллимации телескопической оптической системой блоком призм может быть разделено на два потока. Один из этих потоков используется в качестве референтной опорной линии для выверки направляющей в плане, второй — по высоте. Приемное устройство включает в себя две

независимые фотоэлектрические углоизмерительные системы, каждая из которых содержит свой объектив для приема соответствующего потока излучения ОКГ.

Одним из вариантов принципиальной схемы приемного и передающего устройства является схема, основанная на использовании в качестве опорной линии для выверки прямолинейности направляющих одновременно в плане и по высоте одного потока

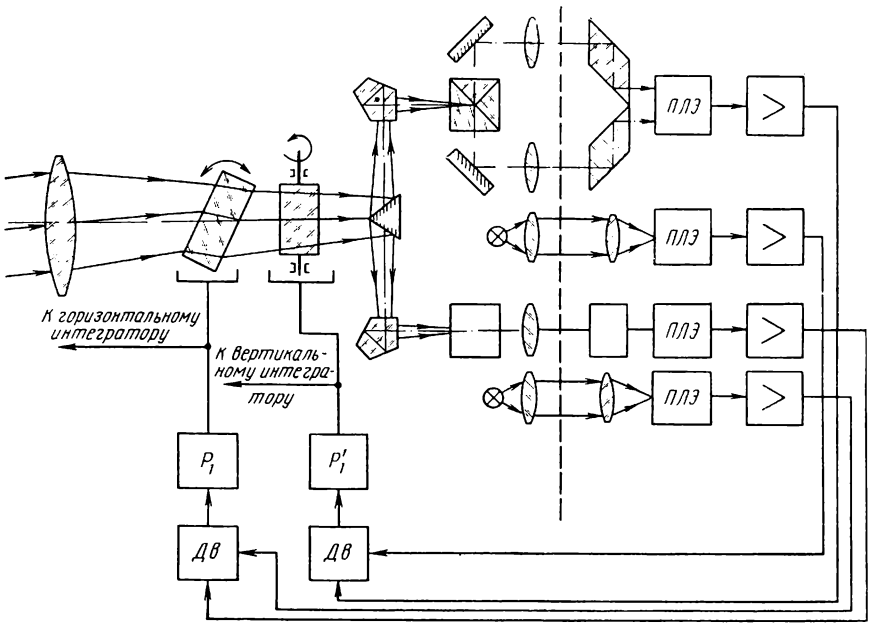


Рис. 105. Схема приемного устройства с последовательным расположением компенсаторов

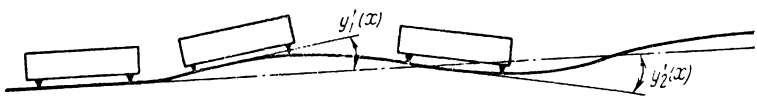


Рис. 106. Схема измерения угловых отклонений направляющих от прямолинейности

излучения ОКГ. С целью обеспечения двухкоординатной выверки излучение ОКГ разделяется на два потока после объектива непосредственно в приемной системе (в широком пучке, до схода пучка лучей ОКГ в фокусе объектива).

Такая конструктивная схема является более рациональной, она содержит меньшее количество элементов и по сравнению с первой схемой обладает тем преимуществом, что использование

одного потока излучения упрощает процесс наведения излучения передающей системы на приемную.

Следует указать, что выбор конструктивной схемы двухкоординатного прибора для автоматического контроля прямолинейности направляющих одновременно в плане и по высоте необходимо производить с учетом величин возможных отклонений.

Если эти отклонения и в плане, и по высоте незначительны, то можно применять схему с раздельными оптико-механическими компенсаторами — свой компенсатор для каждого канала следящей системы. При значительных величинах возможных отклонений направляющих от прямолинейности с целью исключения взаимосвязи координат целесообразно использовать приемное устройство с последовательным расположением компенсаторов, схема которого приведена на рис. 105. Оба оптико-механических компенсатора (для горизонтальной и вертикальной координаты) при этом устанавливаются непосредственно друг за другом.

Во всех вариантах рассмотренных устройств приемная система должна располагаться на жесткой платформе (измерительной тележке), опирающейся на базовые поверхности контролируемой направляющей базовыми роликами. При этом в каждой координатной плоскости измерительная тележка базовыми роликами соприкасается с базовыми поверхностями выверяемой направляющей в двух точках. Из-за отступлений контролируемой направляющей от прямолинейности прямая, соединяющая точки касания базовых роликов, при движении измерительной тележки получает различные углы наклона y_i (x) по отношению к референтной опорной прямой (рис. 106). Эти прямые, соединяющие точки касания базовых роликов с контролируемой направляющей, являются не касательными к базовым поверхностям направляющей, а секущими, проходящими через две точки опоры. Углы между секущими и референтной опорной прямой при малых по сравнению с радиусами кривизны направляющей расстояниях между базовыми роликами (базой прибора) незначительно отличаются от углов между референтной опорной прямой и касательными к направляющей в точках, расположенных посредине точек касания с направляющей базовых роликов.

Для надежного контактирования с выверяемой направляющей измерительная тележка дополнительно должна быть снабжена прижимными роликами. Помимо указанных функций базовые ролики могут осуществлять протягивание масштабной ленты в регистрирующих устройствах приемной системы и обеспечивать привод датчика пути. С этой целью оси роликов должны быть соединены с лентопротяжными механизмами регистрирующих устройств и приводным валом датчика пути кинематическими связями.

Глава VII

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ

§ 30. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ В СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТАХ

При строительстве различных научных и промышленных объектов, в горном деле и машиностроении, при управлении строительными машинами и во многих других областях существует группа геодезических задач, связанных с заданием точных направлений, отвесным проектированием, установкой поточных линий, фиксацией наклонных и горизонтальных плоскостей, управлением машинами при прокладке тоннелей, измерением деформаций и т. д.

Замена обычных геодезических приборов лазерными инструментами во многих случаях позволяет повысить точность и производительность работ, снизить затраты на подготовительные работы, сократить рабочий персонал.

В настоящее время в СССР и за рубежом лазеры используют для разбивочных работ, передачи высотных отметок при проведении крупных строительных работ, планировании местности. В этих случаях отпадает необходимость в применении разметочных шнуров, вех и других приспособлений.

Укладка трубопроводов, канализационных труб с применением лазерных приборов значительно сокращает время на строительно-монтажные операции.

Применение лазерных приборов для установки и выверки технологического оборудования, выравнивания строительных конструкций, внутренних перегородок и стен по вертикали и горизонтали позволяет повысить точность и производительность работ.

Использование лазерных устройств для вертикального проектирования точек дает возможность существенно снизить затраты при строительстве высотных зданий и сооружений башенного типа.

При помощи лазеров можно осуществлять геометрическое и тригонометрическое нивелирование, обозначение направлений.

В зависимости от вида геодезических работ, выполняемых с применением лазерных геодезических приборов, существующие конструкции лазерных инструментов можно разделить на четыре группы: визиры, нивелиры, приборы вертикального проектирования и теодолиты.

В этих приборах, как правило, используют гелий-неоновые лазеры небольшой мощности (до 5 мВт) с рабочей длиной волны

$\lambda = 0{,}6328$ мкм и расходимостью излучения $2 \div 10'$. Для увеличения дальности действия выходное излучение лазера коллимируется с помощью телескопической системы (увеличение 10—30×), и при расстоянии 100—150 м диаметр сечения лазерного луча не превышает $30 \div 60$ мм.

Для приведения приборов в горизонтальное положение часто применяют уровни, для перестановки в небольших пределах — микрометры, иногда лазерные приборы содержат горизонтальные или вертикальные отсчетные круги.

Регистрировать центр лазерного луча в месте приема можно визуально по сеточным экранам, по маркам, по рейке или автоматически, применяя фотоэлектрические детекторы.

Рассмотрим основные принципы построения, конструктивные особенности лазерных геодезических приборов массового назначения и методику выполнения ими геодезических работ.

§ 31. ЛАЗЕРНЫЕ ВИЗИРЫ

Лазерные инструменты геодезического назначения, позволяющие задавать оптическим лучом определенное направление в пространстве, называются лазерными визирами.

В конструкцию отечественных и зарубежных лазерных визиров входит газовый лазер, телескопическая коллимирующая трубка, подставка с подъемным и отсчетным механизмами. Кроме того, они могут содержать установочные уровни, устройства стабилизации направления светового луча, устройства для изменения направления распространения светового луча (оптические насадки) и пр.

Одним из первых приборов, разработанных в СССР для задания направления, является лазерный визир ЛВ-2 [110].

В приборе ЛВ-2 (рис. 107) используют гелий-неоновый лазер ОКГ-11 с выходной мощностью $1 \div 2$ мВт. Для уменьшения расходимости лазерного луча от $7 \div 8'$ до $24''$ в приборе применена телескопическая система с увеличением 25×. Подставка ЛВ-2 дает возможность поворачивать лазер с коллимирующей оптикой в горизонтальной плоскости в пределах 180° и наклонять в вертикальной плоскости в пределах 1,5°.

Микрометренные винты, расположенные на корпусе прибора, дают возможность плавно и точно наводить прибор на объект в двух плоскостях в пределах 1,5° с точностью $30''$. Укрепленные на корпусе прибора два взаимно перпендикулярных уровня с ценой делений $30''$ обеспечивают приведение прибора подъемными винтами в отвесное положение.

Дальность действия лазерного визира ЛВ-2 не менее 500 м с точностью определения координат 10 мм [110].

Лазерный визир ЛВ-2 нашел применение при геометрическом и тригонометрическом нивелировании, при проведении работ

по разбивке трасс. Средняя квадратическая ошибка определения отметок пикетов по высоте составляет около 8,8 мм на дальностях до 250—300 м. Методика выполнения работ с применением визира ЛВ-2 достаточна проста. Прибор устанавливают в начальной точке

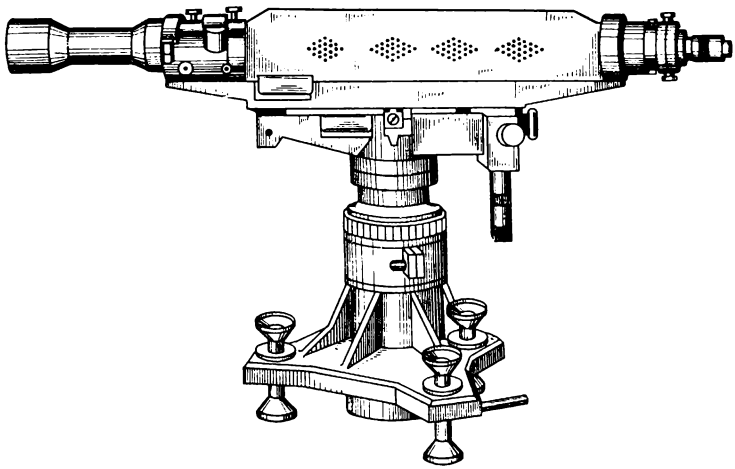


Рис. 107. Лазерный визир ЛВ-2

трассы и в условной системе координат задают отметки начальной и конечной точек. Для разбивки створа и выполнения тригонометрического нивелирования луч лазера наводят на конечную точку трассы. Отметки на каждом пикете определяют по положению центра светового луча на нивелирной рейке.

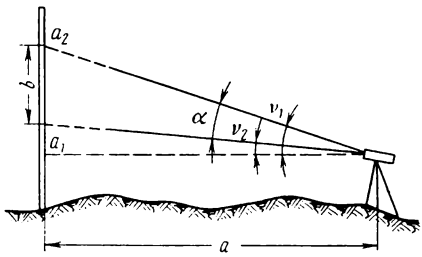


Рис. 108. Схема нивелирования лазерным визиром

В случаях, когда отметка конечной точки трассы неизвестна (рис. 108), уклон луча при тригонометрическом нивелировании определяют по шкале микрометренного винта. Расстояния до определенной точки вычисляют по формуле [121]

$$d \approx \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2},$$

где b — разность отсчетов по рейке, установленной в точке, высотная отметка которой определяется ($b = a_2 - a_1$); a_1 и a_2 положения центров светового пятна на рейке, полученные при двух различных значениях угла наклона ν_1 и ν_2 луча лазера, α — угол, под которым виден отрезок b от источника излучения.

При выполнении лазерным визиром геометрического нивелирования отсчет снимается наблюдателем по положению центра лазерного луча на нивелирной рейке.

Зависимость средней квадратической ошибки отсчета по световому пятну на экране или рейке, полученная экспериментальным путем [121], выражается формулой

$$m_0 = s \cdot 10^{-5} \left(0{,}2 \sqrt{s} \cdot 10^{-3} + 0{,}5\right) + 1{,}5,$$

где s — расстояния до рейки, м.

Лазерный визир ЛВ-4 по техническим данным мало отличается от ЛВ-2. Его конструкция позволяет устанавливать прибор на штативе, тем самым обеспечивая возможность работы в полевых

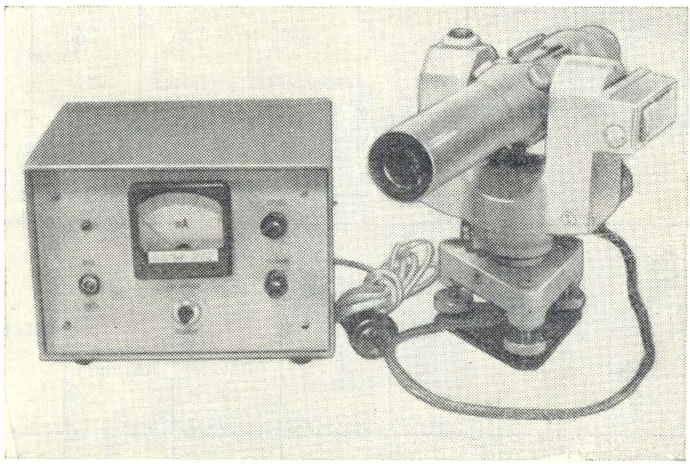


Рис. 109. Лазерный визир ЛВ-5

условиях. Введение в конструкцию прибора высокоточного контактного уровня дает возможность осуществлять его точную установку при выполнении прецизионных работ.

Лазерный визир ЛВ-5 (рис. 109) создан на основе лазера ОКГ-13. Прибор имеет подставку аналогичную конструкции геодезического трегера и вертикальную и горизонтальную оси вращения. Кинематическая схема юстировочных механизмов визира позволяет поворачивать прибор в вертикальной плоскости в пределах 20° и в горизонтальной в пределах 180°. Микрометренные винты позволяют наводить луч лазера на объект в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах 5°. Вертикальная ось прибора приводится в отвесное положение тремя подъемными винтами трегера. Конструкция прибора обеспечивает юстировку телескопической коллимирующей оптической системы относительно резонатора лазера и точное совмещение горизонтальной оси прибора с направлением распространения луча ОКГ.

Лазерный визир ЛВ-5 нашел применение для съемки профиля поверхности взлетно-посадочных полос аэродромов, съемки подкрановых путей и в других инженерно-геодезических работах.

Таблица 7

Тип прибора	ОКГ				Диаметр выходного луча, мм	Расходимость луча, ″	Цена деления уровня, с
	тип	длина волны, мкм	мощность излучения, мВт	долговечность ОКГ, ч			
ЛВ-2	ОКГ-11	0,63	1÷2	>500	30	24	30
ЛВ-4	ОКГ-11	0,63	1÷2	>500	30	24	12
ЛВ-5	ОКГ-13	0,63	0,2÷0,5	500	30	24	20

Продолжение табл. 7

Тип прибора	Дальность действия, м	Температурный интервал, °С	Питание, Гц	Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг		Габариты, мм
					прибора	блока питания	
ЛВ-2	2500	—10 +40	220 36 (50 Гц)	80	22	21	700×330××460
ЛВ-4	2500	—10 +40	220 36 (50 Гц)	80	18	21	700×250××320
ЛВ-5	1700	—10 +40	220 (50 Гц)	30	5,8	5,6	400×190××260

Основные характеристики лазерных визиров ЛВ-2, ЛВ-4, ЛВ-5 приведены в табл. 7.

Фирмой Spectra-Physics (США) выпущено несколько модификаций лазерных визиров для строительно-монтажных работ.

Лазерный визир модели ЛТ-3, «Транзитлай» (рис. 110) предназначен для задания направления лазерным лучом на больших расстояниях. Он широко используется для прокладки тоннелей, в прибрежном водном пространстве для управления работой землечерпающих машин, при укладке трубопроводов.

Лазерный визир ЛТ-3 конструктивно выполнен по образцу геодезического теодолита и содержит лазер *2* с телескопической оптической системой *1*, установленные на подставке *10* с юстировочными механизмами. Телескопическая оптическая система *1*

имеет устройство *14* для дополнительной регулировки диаметра лазерного луча. В горизонтальное положение прибор приводится сферическим уровнем *13* при помощи установочных винтов *11*; винты *5* и *12* являются зажимными.

Для точной установки над точкой прибор имеет метку *3*, нанесенную на ручке *4*. Точное наведение при измерении вертикального и горизонтального углов осуществляется винтами *8* и *9*; величина угла наклона проверяется по наклономеру *6*. Визирная

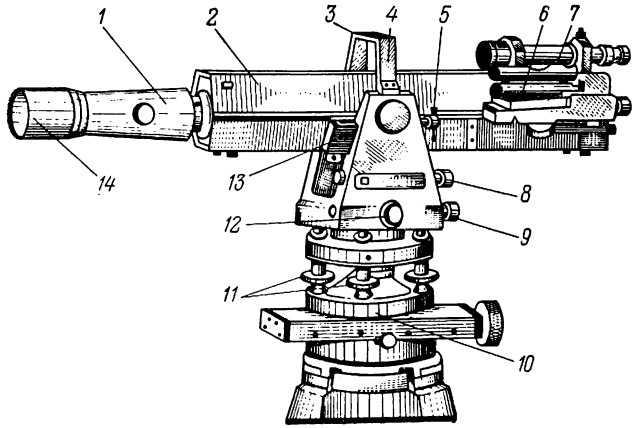


Рис. 110. Лазерный визир ЛТ-3

труба *7* предназначена для первоначального ориентирования прибора в пространстве.

Технические данные визира ЛТ-3:

Мощность излучения, мВт	не менее 5
Диаметр лазерного луча на расстоянии 330 м, мм	24
Пределы фокусировки, м	от 15 до ∞
Минимальный диаметр сфокусированного луча на расстоянии 15 м, мм	1,2
Допустимые углы наклона в вертикальной плоскости, °	30
Углы поворота в горизонтальной плоскости	360°
Чувствительность уровня, ″	60
Масса прибора, кг	9
Рабочий диапазон температур, °С	от —20 до +65
Питание прибора:	
переменным током	220 В 10% 50—400 Гц
постоянным током	30 В

Лазерный визир модели 855 «Дайлгрейд» предназначен в первую очередь для точной прямолинейной прокладки самотечных канализационных труб. Прибор помещается в траншее или смотровом колодце в таком положении, чтобы лазерный луч был

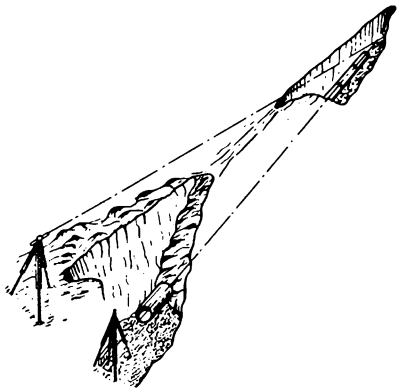


Рис. 111. Схема лазерного визира

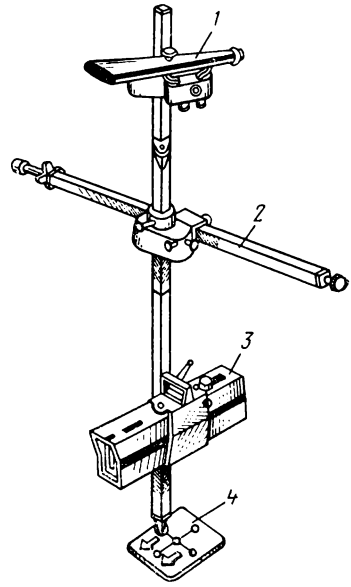


Рис. 113. Универсальная распорная штанга

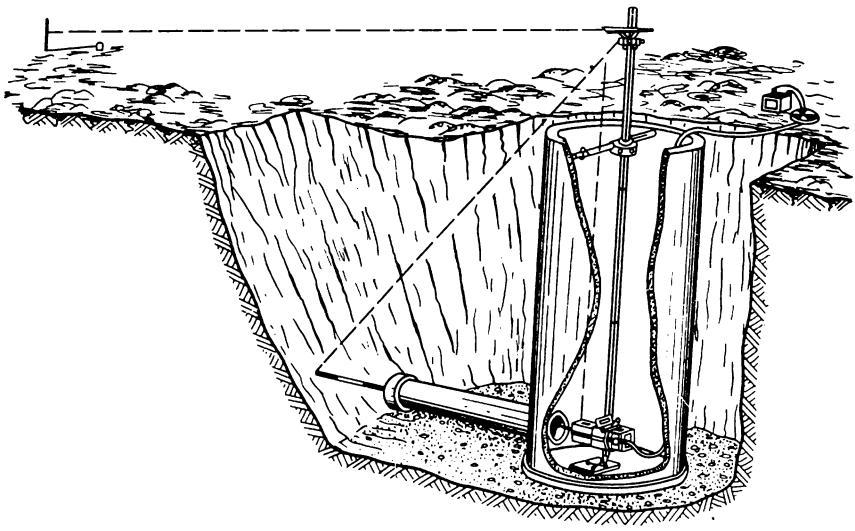


Рис. 112. Схема определения конечной точки участка

точно нацелен на центр трубы. Лазерный визир снабжен точным уклономером, вмонтированным в водонепроницаемый корпус. Схема применения лазерного визира при укладке труб с заданным уклоном показана на рис. 111.

При помощи специальных установочных приспособлений, входящих в комплект прибора, лазерный визир закрепляется в исходное проектное положение и его луч направляют через центр входного диаметра трубы на конечную точку участка, определяемую геодезической засечкой при помощи обычного геодезического инструмента (рис. 111) или геодезической трубой, входящей в комплект лазерного визира (рис. 112).

Составная распорная штанга (рис. 113) позволяет точно совмещать в одной плоскости оптическую ось лазерного луча лазерного визира *3* с оптической осью зрительной трубы *1*. При помощи упора *2* и подставки *4* закрепляют лазерный визир в рабочем положении. При необходимости такая распорная штанга дает возможность укреплять лазерный визир непосредственно на прокладываемой трубе (рис. 114). Прибор «Дайлгрейд» рассчитан на укладку труб с уклоном от 10 до 20%.

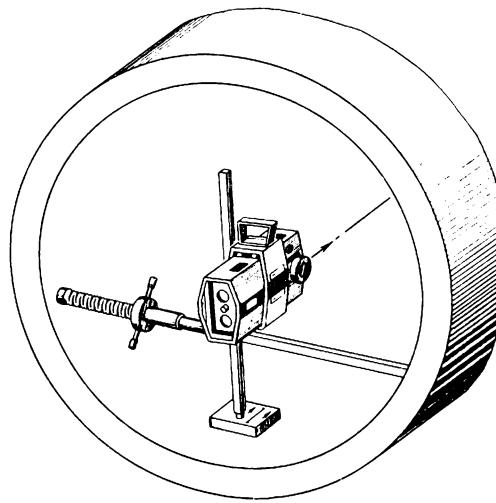


Рис. 114. Схема крепления лазерного визира в трубе

Техническая характеристика «Дайлгрейд»:

Дальность действия, м	300
Мощность лазерного луча, мВт	1
Диаметр луча визира, мм	не более 20 на 180 м
Увеличение телескопической трубы ×	7
Стабильность луча, мм	5 на 180 м
Питание прибора	от батареи напряжением 12 В

Разновидностью описанного лазерного визира являются модели 833, 410—527, 955 SL и др. Лазерные визиры указанных модификаций отличаются друг от друга наличием вспомогательных приспособлений, обеспечивающих в необходимых случаях поступательное параллельное перемещение прибора по направляющей

штанге по горизонту до 30 мм, изменение углов наклона луча в вертикальной плоскости до 2 и в горизонтальной до 4° [25].

Оценивая современное состояние и перспективы создания новых лазерных визиров для высокоточных работ, можно сказать, что успех дела во многом зависит от надежности и качества элементов визира и в первую очередь самого лазера, и от конструкторского исполнения прибора.

Лазерные визиры, применяемые для высокоточных работ, должны содержать устройства внутреннего контроля, автоматической стабилизации направления распространения лазерного луча, иметь в комплекте высокоточные фотоэлектрические детекторы для производства автоматических измерений.

§ 32. ЛАЗЕРНЫЕ НИВЕЛИРЫ

Лазерные нивелиры, как и лазерные визиры, в последние годы все шире внедряются в инженерно-геодезические работы. В конструктивном отношении этот класс геодезических приборов значительно сложнее лазерных визиров, так как эффективность их использования на практике в первую очередь определяется требованиями автоматизации измерений, повышением точности измерений, расширением диапазонов измеряемых превышений и увеличением расстояний визирования.

При создании лазерных нивелиров приходится одновременно решать несколько основных задач: обеспечить стабильное во времени горизонтальное положение лазерного луча, создать видимую светящуюся плоскость, повысить точность измерения, автоматизировать процесс отыскания центра лазерного луча и сохранить равноточность измерений при различных длинах визирного луча.

Обеспечить указанные требования, одновременно сохраняя малые габариты прибора, является весьма сложной задачей как для науки, так и для практики.

Известно, что стабильность пространственного положения лазерного луча определяется температурными деформациями резонатора лазера и самого лазерного нивелира, конструктивной схемой прибора, тщательностью изготовления и сборки его узлов и др.

Если влияние температурных деформаций резонатора лазера можно в ряде случаев скомпенсировать (см. § 16), применяя специальные фотоэлектрические автоматические стабилизаторы положения луча, то самопроизвольный уход с горизонта лазерного луча из-за нестабильности конструкции самого прибора является сложной технической задачей. Поэтому конструктивная схема лазерного нивелира должна быть тщательно отработана.

Сократить время и упростить процесс измерений при нивелировании можно, если лазерным лучом сформировать светящуюся плоскость в пределах 360°. Однако, учитывая инерционные свойства человеческого зрения, чтобы обеспечить непрерывно светя-

щейся плоскость, развертку лазерного луча вокруг вертикальной оси прибора необходимо выполнять с частотой около 25 об/с. При такой скорости развертки сколлимированного лазерного луча, если применить для регистрации фотоэлектрические детекторы, время пребывания лазерного луча на фотоприемнике весьма мало, к тому же изменяется оно в широких пределах в зависимости от длины визирного луча при нивелировании. Это обстоятельство требует применения высокочувствительных и широкополосных электронных схем детекторов. Увеличение же углового раствора

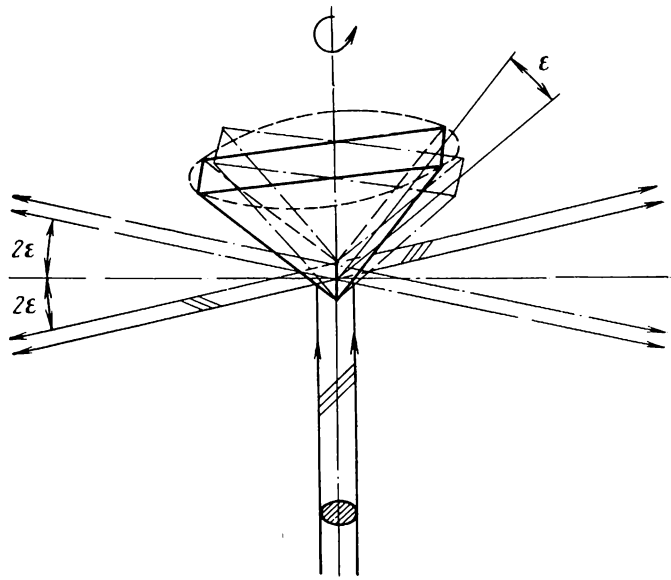


Рис. 115. Схема развертки лазерного луча

лазерного луча с целью повышения времени пребывания его на фотоприемнике детектора при помощи специальных оптических систем, например цилиндрической оптики, ухудшает энергетические соотношения в фотоэлектрическом детекторе. Это вызывает в свою очередь снижение точности измерений, поэтому при создании лазерных нивелиров с фотоэлектрической регистрацией необходимо искать пути преодоления указанных трудностей.

Известные в настоящее время конструкции лазерных нивелиров пока не в состоянии в полной мере удовлетворить изложенным требованиям. Однако в ряде случаев их применение оказывается весьма эффективным на производстве, особенно при выполнении нивелирных работ среднего и низкого классов точности.

Рассмотрим принципы построения конструктивных схем известных лазерных нивелиров. Лазерный инструмент «Гейоплейн-300» фирмы AGA (Швеция) предназначен для нивелирования при производстве различных строительных работ [128]. Нивелирование

основано на принципе вращающегося лазерного луча, задающего горизонтальную плоскость на известной высоте.

Способ задания опорной плоскости световым лучом у данного прибора отличен от нивелиров других марок. Лазер конструктивно расположен вертикально и его излучение направляется на грань прямоугольной призмы с зеркальными поверхностями (рис. 115).

Призмой луч света разделяется на два луча, расходящихся в противоположных направлениях. Призма вращается относительно оси, совпадающей с осевой линией пучка лучей лазера, однако сама призма наклонена к оси светового пучка на небольшой угол ε. Поэтому отраженные лучи также соответственно наклонены к горизонту на углу $+2\varepsilon$ и -2ε.

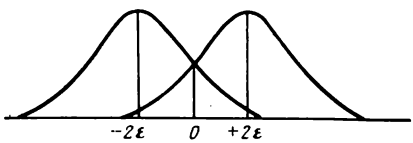


Рис. 116. График распределения интенсивности света

При вращении призмы световые лучи описывают в пространстве две конические поверхности, плоскость симметрии которых является опорной геодезической плоскостью.

В любой точке, лежащей на указанной геодезической плоскости на некотором расстоянии от инструмента, будут наблюдаться последовательные вспышки света одинаковой интенсивности, причем частота этих вспышек в два раза выше числа оборотов призмы.

Если глаз наблюдателя точно располагается на геодезической плоскости, то уже при скорости вращения призмы 10 об/с вследствие инерции зрительного восприятия свет в этой точке будет казаться непрерывным. В точках, лежащих выше или ниже геодезической плоскости, свет при визуальном наблюдении кажется мерцающим. Распределение интенсивности света на геодезической плоскости и в ее окрестности графически показано на рис. 116.

Методика выполнения нивелировочных работ с применением прибора «Гейоплейн-300» предусматривает как визуальную регистрацию превышений с использованием нивелирной рейки специальной конструкции, так и фотоэлектрическую индикацию. В последнем случае реечник передвигает фотодетектор по рейке в поисках минимального отсчета по индикатору прибора между двумя максимумами.

Основные технические данные нивелира:

Точность на расстоянии 100 м, мм	2
Расходимость пучка лучей лазера, мрад	1 (10^{-3} мм на 100 м)
Дальность действия:	
при визуальной регистрации, м	50—100
при фотоэлектрической регистрации, м	150
Масса инструмента со штативом, кг	8
Питание от аккумулятора напряжением, В	12
Диапазон микрометренных перемещений по высоте, мм	170

Выходная мощность лазера, мВт	не менее 1
Потребляемая мощность, Вт	15

Контроль рабочего положения нивелира осуществляется по высокоточному уровню.

Лазерный нивелир, предложенный Л. Джонсоном [135], представляет собой прибор, состоящий из двух блоков — лазерного визира с устройством круговой развертки луча и отсчетной рейки

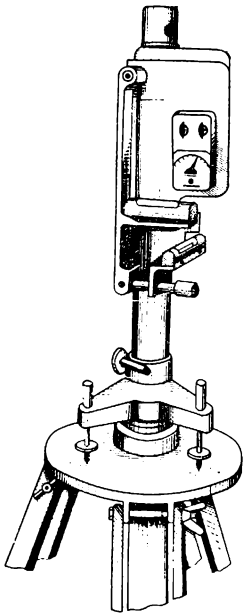


Рис. 117. Лазерный нивелир Джонса

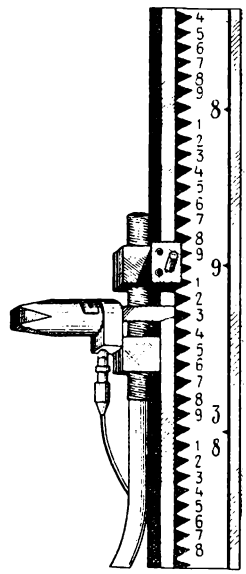


Рис. 118. Отсчетная рейка с фотоэлектрическим детектором

с фотоэлектрическим детектором. Газовый оптический квантовый генератор в нивелире Джонса и телескопическая коллимирующая оптическая система вмонтированы в полую жесткую трубу геодезического штатива вертикально и укреплены (рис. 117). Нивелир снабжен тремя установочными винтами, при помощи которых по накладному уровню его устанавливают в отвесное положение с точностью 5″. При помощи микрометренного винта и дополнительного цилиндрического уровня можно задавать в небольших пределах (до 10%) наклоны лазерного луча. Для развертки лазерного луча в плоскость в нивелире применена вращающаяся со скоростью 2 об/с от электропривода пентапризма. Нивелир оборудован командным постом. Выдвижная несущая колонка позволяет регулировать по высоте положение геодезической световой плоскости. Изменение высоты выдвижения колонки осуществляется рукояткой кремальерного механизмма. Конструкция нивелира предусматривает надежную фиксацию выдвижной колонки в штативе.

Отсчетная рейка с фотоэлектрическим детектором (рис. 118) содержит поисковую головку, которая приводится в движение вдоль рейки при помощи командного устройства. При вхождении детектора в зону лазерной плоскости командное устройство подает звуковые сигналы. Для определения отсчета по рейке необходимо определить два положения детектора (снизу и сверху от плоскости), при которых сигналы прекращаются. В этот момент центральный отсчетный индекс детектора автоматически устанавливается в положение, соответствующее центру выделенного лазерного луча. Командное устройство обеспечивает быстрое перемещение детектора по рейке при поиске лазерного луча и медленное

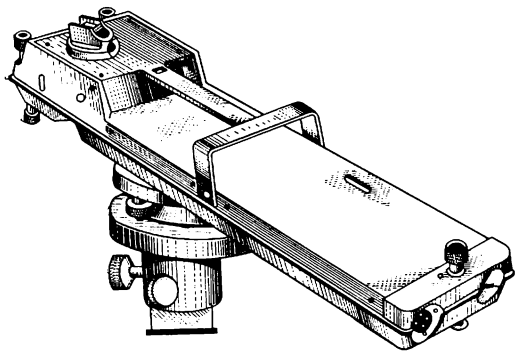


Рис. 119. Общий вид прибора «Ротолайт»

микрометренное перемещение при вхождении его в зону лазерной световой плоскости. Отсчеты снимают по положению центрального индекса на шкале рейки. Для расширения диапазона измеряемых превышений рейка оборудована перемещающейся оцифрованной замкнутой лентой.

Такой лазерный нивелир предназначен для съемки местности и обеспечивает точность определения превышений около 2 см на расстояниях от 300 до 1000 м в зависимости от внешних условий.

Интересным в конструктивном отношении является лазерный прибор «Ротолайт» фирмы Spectra — Physics (рис. 119). Этот прибор с успехом применяется для монтажных работ в строительстве, выравнивания внутренних перегородок и стен по горизонтали и вертикали, с его помощью можно контролировать высоту и плоскость бетонного настила, выравнивать и нивелировать строительную площадку, проводить контроль за модульной конструкцией и сборкой и т. д.

Строительный лазерный нивелир «Ротолайт» конструктивно выполнен в виде перепосного прибора и содержит миниатюрный оптический узел развертки луча в плоскость. Развертка луча в приборе осуществляется вращающейся пентапризмой с электроприводом, причем скорость ее вращения может плавно регулироваться от нуля до 5 об/с. Прибор устанавливается на штативе

в одно из двух положений, при котором обеспечивается развертка луча в горизонтальной плоскости с помощью прецизионных цилиндрических уровней или в вертикальной.

Лазерный прибор «Ротолайт» можно использовать и для вертикального проектирования точек, а также как лазерный визир. Для этого достаточно переключить отражательную прямоугольную призму в узле развертки луча и закрепить прибор на штативе в соответствующем положении.

Работа с прибором может осуществляться или визуально, или с применением специального фотоэлектрического детектора, который реагирует на центр лазерного луча. Он смонтирован на специальной рейке, имеющей нониусную шкалу. Фотоэлектрический детектор выполняет роль нуль-индикатора, отсчет превышений снимают по шкале рейки (рис. 120).

Примеры практического применения «Ротолайта» схематически изображены на рис. 121, 122.

Прибор обеспечивает точность измерений около 0,5 мм на расстоянии до нескольких десятков метров.

Для высокоточного определения превышений при нивелировании Хржановским и Ахмедом [129] был сконструирован фотоэлектрический лазерный нивелир, в котором приведение прибора в отвесное положение обеспечивается применением специального оптико-электронного канала внутренней выверки (рис. 123).

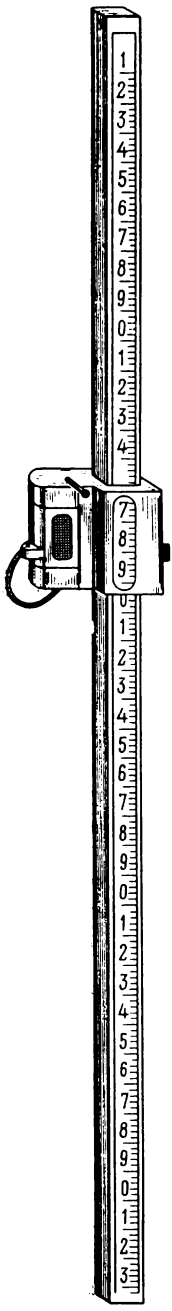
Луч лазера *2* из вертикально подвешенного резонатора поступает на коллимирующую оптическую систему *4* и далее на светоделитель *6*, где разделяется на два потока: один из них выходит наружу, второй — поступает во внутренний канал выверки. Внутренний канал выверки состоит из фокусирующей линзы *7*, резервуара *9* со ртутью, на поверхности которого плавает плоское зеркало *10*, и фотоэлектрического центрирующего детектора *5* с нуль-индикатором *8*.

Установку лазера *2* производят с помощью червячной передачи *1* и карданного подвеса *3* таким образом, чтобы отраженный от плоского зеркала *10* луч лазера находился в центре фотодетектора. При соблюдении этого условия гарантируется строго горизонтальное направление распространения лазерного луча.

Чтобы избежать колебаний плавающего зеркала во время поворота прибора вокруг вертикальной оси, зеркало удерживается в установленном центральном положении в резервуаре со ртутью с помощью трех штифтов *11*.

Возможное отклонение луча от горизонтали (за счет погрешностей, вносимых светоделителем, и юстировки прибора) постоянно для всех направлений и ввиду его малости не вносит сколь-либо значительных ошибок при измерениях.

Точность нивелирования, таким образом, зависит от чувствительности центрировочного фотодетектора и от того, на каком расстоянии он находится от плавающего зеркала.



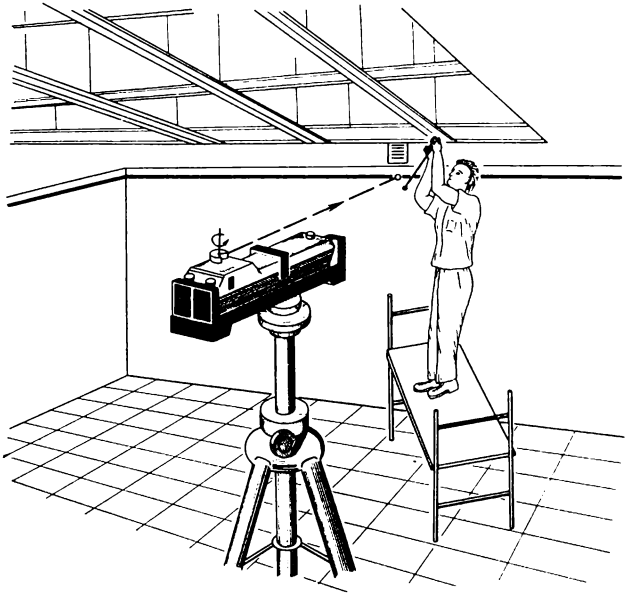


Рис. 121. Монтаж оборудования с использованием прибора «Ротолайт»

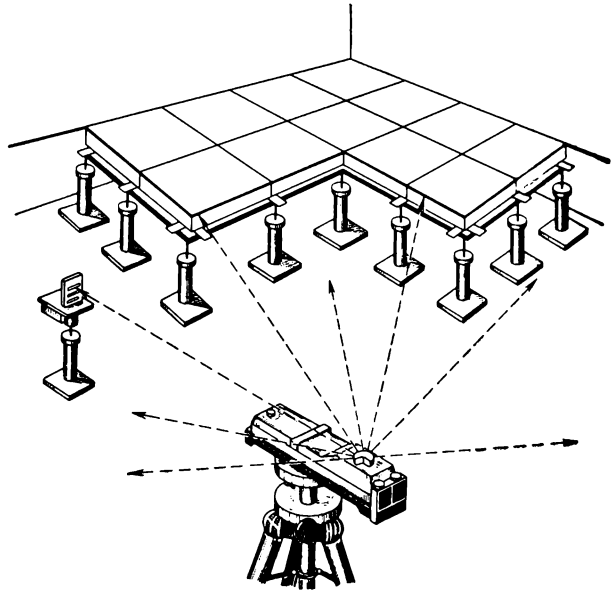


Рис. 122. Нивелирование прибором «Ротолайт»

Рис. 120. Фотоэлектрический детектор с рейкой

При экспериментальных исследованиях расстояние от резервуара со ртутью до центрирующего детектора изменялось от 40 см до 1,5 м и при ошибке центрирования порядка 2 мкм (в угловой мере — 0,13″) соответствовало погрешности нивелирования в 0,02 мм при расстоянии между точками в 50 м.

Несмотря на высокую точность горизонтирования луча, такой нивелир нельзя считать удачным в конструктивном отношении. Значительные габариты, определяемые в первую очередь требованиями канала внутренней выверки, неудобство транспортировки прибора из-за наличия резервуара со ртутью ограничивают его практическое использование.

Более перспективным для целей горизонтирования луча следует считать применение в оптической схеме лазерного нивелира геодезических нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования (например, НС-4, Ni 007 и др).

Оптические трубы нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования не только с высокой точностью приводят луч лазера в горизонтальную плоскость, но и одновременно являются хорошими коллимирующими устройствами. Их применение позволит существенно уменьшить габариты и массу приборов, понизить требования к точности установки приборов в рабочее положение.

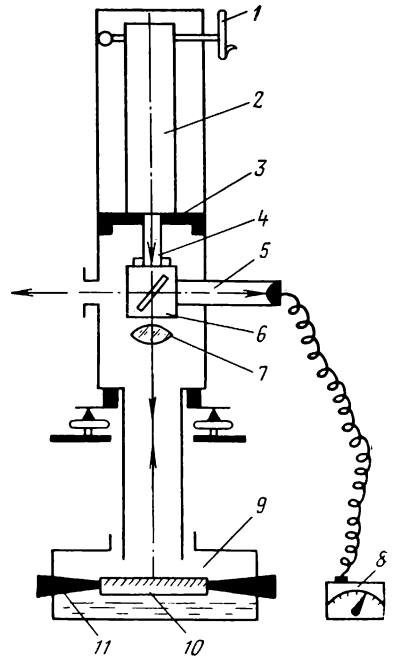


Рис. 123. Схема лазерного визира с каналом внутренней выверки

Первые опыты применения таких систем [130] показали их высокие точности. Так при использовании гелий-неонового лазера совместно с нивелиром Ni 007 на экспериментальной линии длиной около 1 км получили погрешность порядка 1 мм/км.

Перспективным для использования в лазерных нивелирах следует считать также возможность создания двойной развертки лазерного луча, при которой один луч создает видимую геодезическую плоскость, а второй является информативным, измерительным. Для реализации этой возможности необходимо использовать излучение с обоих концов резонатора лазера и один из лучей после коллимации развертывать со скоростью около 25 об/с, а второй более медленно (до 1—2 об/с). Такое построение схемы лазерного нивелира даст возможность работать с прибором как визуально,

так и с высокой точностью выполнять измерения автоматическим фотоэлектрическим детектором.

Высокая точность и объективность измерений при применении лазерных нивелиров во многом зависит от параметров регистрирующих детекторов, которые, кроме того, должны иметь небольшие габариты, низкие питающие напряжения, высокую производительность. Изучение известных типов фотоэлектрических детекторов и их характеристик указывает на перспективность

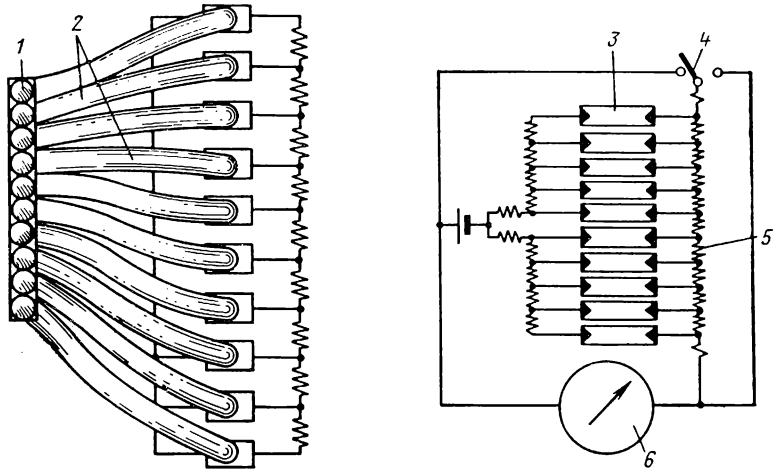


Рис. 124. Схема мозаичного фотоэлектрического детектора

применения в лазерных нивелирах мозаичных детекторов (рис. 124) с использованием волоконной оптики. Один из таких детекторов описан в [134].

В детекторе элементы *3* приемника (см. рис. 124) в направлении измеряемой координаты имеют малые размеры. Существенное сокращение поперечных размеров достигнуто применением световодов *2*, соединяемых с фотоэлектрическими принимающими элементами *3*. Эти элементы подключены и расположены параллельно практически без зазоров, и разделены один от другого одинаковыми сопротивлениями *5*, образующими электрическую цепь, замыкаемую переключателем *4*. При засвечивании лазерным пучком каких-либо элементов блока *1* переводят последовательно переключатель в крайние положения и измеряют ток во всей цепи, а затем в части, ограниченной принимающим элементом. Отношение токов с помощью усилителя и вычислительного устройства преобразуется в измеряемую координату, которая автоматически регистрируется устройством *6*. Результаты измерения практически не зависят от температуры, влияющей одинаково на все сопротивления, от диаметра сечения пучка и от турбулентности атмосферы благодаря особенностям интегрирующего устройства.

§ 33. ЛАЗЕРНЫЕ ПРИБОРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При строительстве высотных зданий, сооружений башенного типа, для передачи плановых координат с одного монтажного горизонта на другой, в маркшейдерском деле применяют оптические приборы вертикального проектирования — зенит-приборы. Зенит-приборы находят также широкое применение в инженерной геодезии при установке и выверке по вертикали различных конструкций.

Для указанных целей на практике применяют зенитные центрировочные приборы ОЦП-2, «Зенит-ОЦП», ПОВП [54], PZL (фирма К. Цейсс, ГДР) и др.

При работе с зенит-приборами их центрируют над исходной опорной точкой и приводят линию визирования в вертикальное положение. На монтажном горизонте для закрепления проектируемых точек размещают особые консольные марки с целиками или прозрачные палетки с сеткой прямоугольных координат. С тем чтобы с помощью зенит-прибора построить оптическую вертикаль в намеченных направлениях, в межэтажных перекрытиях сооружений оставляют небольшие сквозные отверстия.

Точность передачи координат при вертикальном проектировании $m_{оп}$ зависит от многих факторов, в первую очередь от ошибки приведения линии визирования в отвесное положение $m_н$, ошибки визирования $m_в$, ошибки центрирования $m_ц$, ошибки за влияние внешних условий

$$m_{оп}^2 = m_н^2 + m_в^2 + m_ц^2 + m_{вн}^2. \qquad (141)$$

Для названных оптических приборов вертикального проектирования при благоприятных условиях наблюдения средняя квадратическая ошибка проектирования точек на высоту 50—70 м не выходит за пределы 2,0 мм [54].

Однако дальнейшее повышение точности вертикального проектирования, увеличение расстояний визирования, повышение производительности и объективности измерений можно достичь лишь применением полуавтоматических и автоматических зенит-приборов. Поэтому в последние годы разработке и созданию таких приборов стали уделять значительное внимание.

Использование оптических квантовых генераторов в зенит-приборах в качестве источника излучения дает возможность увеличить до сотни и более метров расстояние визирования, в ряде случаев автоматизировать процесс измерения.

При разработке лазерных зенит-приборов, удовлетворяющих современным высоким требованиям точности строительно-монтажных работ, необходимо преодолеть ряд серьезных технических трудностей: обеспечить строго отвесное и стабильное во времени положение оптической оси лазерного луча, автоматизировать процесс отыскания энергетического центра луча, сохранить равноточность измерений при измерении в широких пределах расстояния между зенит-прибором и фотоэлектрическим детектором.

Рассмотрим на примере некоторых конструкций, какими способами можно реализовать вышеперечисленные требования.

Одной из первых явилась конструкция лазерного прибора ЛЗЦ-1 [83].

Лазерный зенит-центрир ЛЗЦ-1 состоит из собственно зенит-центрира и блока питания лазера. Прибор изготовлен на основе 2-секундного триангуляционного теодолита и лазера ОКГ-14, установленного на подставке теодолита вертикально на месте зрительной трубы. Для уменьшения расходимости луча применен коллиматор в виде оптической телескопической трубы с увеличением 25×.

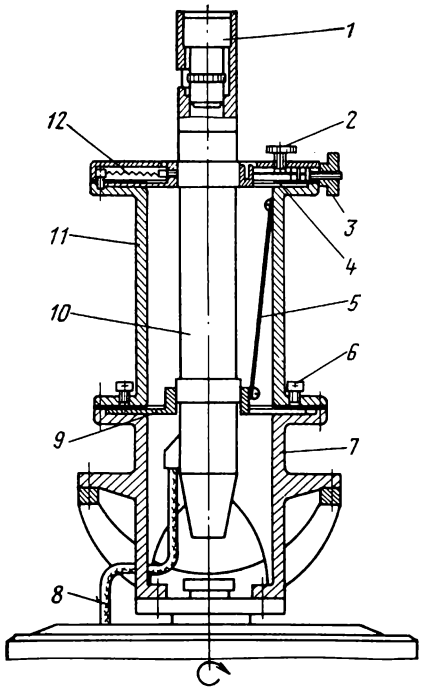


Рис. 125. Схема верхней части прибора с лазерным устройством

В вертикальное положение луч лазера приводится по высокоточному уровню, установленному на верхней вращающейся части инструмента. (Цена деления уровня в опытном образце прибора составляла 8″.)

Для обеспечения перпендикулярности оси цилиндрического уровня оси вращения лазера и совмещения оси луча лазера с осью его вращения конструкция прибора содержит специальные приспособления. Верхняя часть инструмента, содержащая лазерное устройство, показана на рис. 125.

В корпусе *11* крепится лазер *10* в специальных обоймах *9*. Эти обоймы соединены с мембраной *7*, которая может горизонтально перемещаться для центрирования оси лазера относительно оси вращения прибора. Центрирование оси лазера осуществляется с помощью винтов грубой *3* и точной *2* юстировки, а также юстировочной пластины *4* и возвратной пружины *12*. Ошибка центрирования с применением описанного механизма не превышает нескольких мкм. Закрепление лазера после центрирования в корпусе прибора проводится стопорными винтами *6*, которые прижимают мембрану *7* к фланцу корпуса. Пластина *5* служит для ликвидации возможных колебаний лазера вдоль вертикальной оси. Коллиматорная трубка *1* жестко закреплена в верхней части прибора, питание лазера осуществляется от блока питания через кабель *8*.

Определение координат центра лазерного луча на соответствующем строительном или монтажном горизонте при работе с при-

бором ЛЗЦ-1 производят визуально по прямоугольной координатной сетке.

Для передачи координат по вертикали прибор устанавливают на знаке на ориентируемом горизонте и при помощи уровня луч лазера приводят в вертикальное положение. На исследуемом горизонте отыскивают центр лазерного луча и закрепляют эту точку специальным знаком (отвесом, гвоздем и т. п.), а затем,

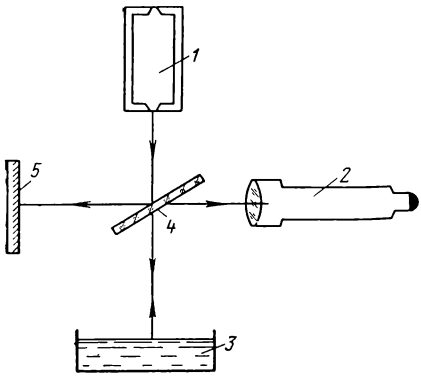


Рис. 126. Оптическая схема однолучевого лазерного прибора

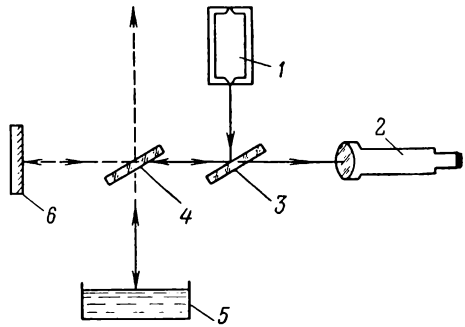


Рис. 127. Оптическая схема двухлучевого лазерного прибора:

1 — лазер, *2* — телескоп, *3*, *4* — делитель пучка, *5* — резервуар со ртутью, *6* — плоское зеркало

выполняя от нее линейные измерения, развивают на монтажном горизонте необходимые сети микротрилатерации.

Прибор ЛЗЦ-1 обеспечивает проектирование точек с предельной ошибкой 15 мм на 300 м, дальность проектирования может достигать 400—600 м.

Анализ конструкции такого лазерного зенит-прибора позволяет выявить его определенные недостатки: точность вертикального проектирования определяется стабильностью направления распространения лазерного луча и никак не контролируется во время работы, чувствительность цилиндрического уровня недостаточна для выполнения высокоточных геодезических работ, визуальный способ отыскания центра лазерного луча вносит в результаты измерения субъективные ошибки.

В [17] дано описание конструкции лазерного зенит-прибора, в который с целью повышения точности приведения лазерного луча в отвесное положение введен внутренний канал выверки (схема предложена А. Хржановским, Канада).

Основные части прибора (рис. 126): газовый лазер *1*, плоское зеркало *5*, светоделитель *4* пучка лучей, зрительная труба *2* и резервуар *3* со ртутью, на которую нанесен слой масла.

При настройке прибора перемещают по углу плоское зеркало *5* и лазер *1* и совмещают по перекрестию сетки нитей в зрительной

трубе *2* изображение луча, отраженное от плоского зеркала *5* и ртутно-масляного зеркала *3*. Выполнив эти операции, резервуар со ртутью удаляют, пучок лучей лазера оказывается направлен вертикально: прибор готов к работе.

Такая оптическая схема позволяет выполнять вертикальное проектирование точек только с верхнего горизонта на нижние. Для переноса точек снизу вверх указанную оптическую схему дополняют вторым делителем пучка *3* (рис. 127).

Для измерений, не требующих высокой точности, прибор можно устанавливать по вертикали с помощью прецизионного уровня. Использование в зенит-приборе канала внутренней выверки позволило достичь точности приведения луча в вертикальное положение порядка 0,5″. Одной из конструктивных особенностей описываемого прибора является также применение в качестве светоделителя специальной пленки толщиной 8 мкм. Это значительно уменьшает внутреннее отражение и повышает точность по сравнению со стеклянной делительной пластинкой.

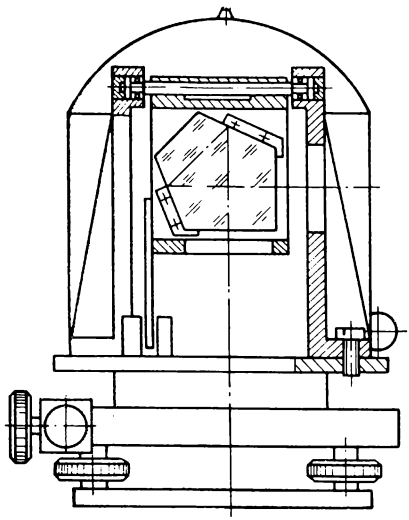


Рис. 128. Оптико-механический компенсатор с пентапризмой

Для обеспечения высокой точности наблюдения совпадений отраженных лучей в зенит-приборе можно применять фотоэлектрические детекторы.

Регистрировать положение центра лазерного луча при работе с прибором можно или визуально, или применяя специальные фотоэлектрические детекторы (см. § 24). Лазерный зенит-прибор рассмотренной конструкции обеспечивает высокую точность вертикального проектирования, однако использовать эти приборы в инженерно-геодезических работах для массового применения, например в строительстве, не представляется возможным.

Автоматическую установку лазерного луча (линии визирования) в отвесное положение с высокой точностью по двум координатам можно обеспечить, применяя в приборах вертикального проектирования специальные оптико-механические стабилизаторы направления линии визирования.

В настоящее время известно несколько конструкций таких стабилизаторов. Некоторые из них выполнены в виде самостоятельных устройств и могут применяться в качестве насадок к геодезическим инструментам, другие органически вписаны в конструкцию оптических измерительных устройств.

Одним из наиболее распространенных типов является стабилизатор (рис. 128), выполненный в виде пентапризмы, подвешенной на вращающейся в шарикоподшипниках оси, лежащей в плоскости, симметричной главному сечению пентапризмы перпендикулярно входной грани [85].

Такой стабилизатор (см. рис. 128) юстируется относительно оптической оси лазерного луча таким образом, чтобы горизонтальный пучок света, входящий в призму, выходил из нее вертикально. Вертикальность направления лазерного луча по второй координате обеспечивается автоматически, исходя из свойств пентапризмы, и зависит только от точности ее изготовления.

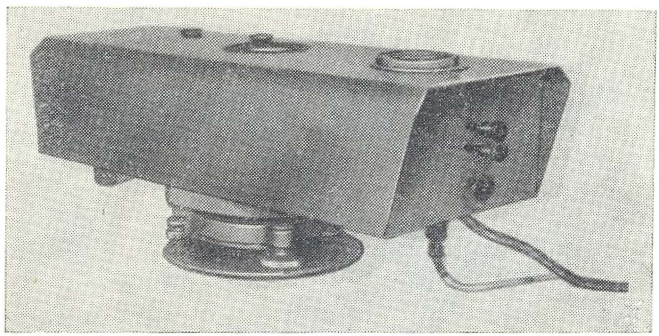


Рис. 129. Общий вид лазерного прибора вертикального проектирования

Описание конструкций более сложных стабилизаторов и анализ причин, в силу которых они не нашли широкого практического применения, приведены в [93, 42, 86]. Наряду с применением специальных стабилизаторов для лазерных приборов вертикального проектирования могут быть с успехом использованы зрительные трубы геодезических инструментов с компенсаторами, обеспечивающими автоматическую установку линии визирования в горизонтальное направление.

Применение таких труб в качестве коллимирующих оптических систем для уменьшения расходимости лазерного луча совместно с пентапризмами, поворачивающими луч лазера на 90°, следует признать весьма перспективным.

Для строительно-монтажных работ в МИИГАиК создан опытный образец лазерного прибора вертикального проектирования с самоустанавливающейся линией визирования и фотоэлектрической регистрацией.

Прибор (рис. 129, рис. 130) позволяет осуществлять вертикальное проектирование точек как вверх, так и вниз, а также при использовании дополнительных оптических насадок может выполнять функции лазерного визира со строго горизонтальным положением лазерного луча.

Оптическая схема прибора позволяет визуально, наблюдая в окуляр зрительной трубы — нивелира НС-4, осуществлять предварительное наведение визирной линии на фотоэлектрический детектор.

Основными узлами прибора (рис. 130) являются: лазер *7*, модулятор *8*, блок призм *1*, нивелир *2* с самоустанавливающейся линией визирования, пентапризма *4* с механизмом ее перемещения *5*, прецизионный уровень *3*, корпус прибора, координатный столик, с осевой системой, позволяющей поворачивать прибор на 360°,

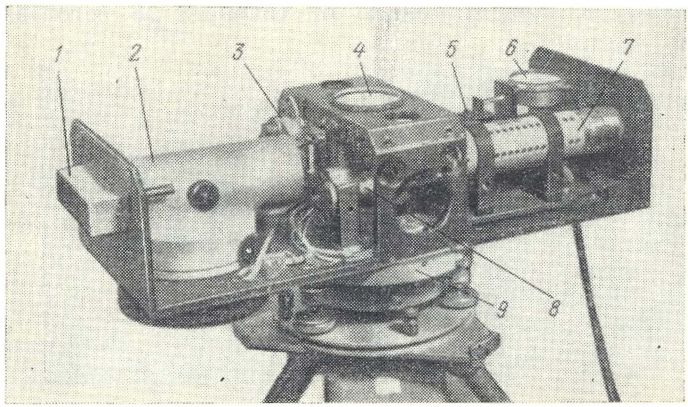


Рис. 130. Схема лазерного прибора вертикального проектирования

треггер, индикатор *6* часового типа, рычаг *9*, фиксирующий заданное рабочее положение прибора относительно вертикальной оси.

Блок призм *1* направляет пучок лучей лазера ОКГ-13 в окуляр нивелира НС-4, а также позволяет наблюдателю через окуляр визировать на фотодетектор (при повернутом на 90° вокруг специальной оси блоке призм), располагаемый на соответствующем монтажном горизонте. Кнопки позволяют устанавливать пентапризму *4* в положение «зенит» или «надир». Рукоятка кинематически связана высокоточным микрометренным механизмом с блоком пентапризмы *4* и позволяет при ее вращении задавать линейное смещение лазерного луча в диапазоне 10 мм. Отсчет величины линейного перемещения пентапризмы *4* осуществляется по индикатору *6* с точностью 0,01 мм. Модулятор *8* выполнен в виде механического обтюратора, приводимого во вращение от электродвигателя постоянного тока ДПМ-35. Модуляция потока излучения лазера необходима в схеме лазерного прибора для работы фотоэлектрического детектора и защиты детектора от влияния фоновых засветок. Координатный столик специальной конструкции и треггер имеют сквозные отверстия, соответствующие световому диаметру лазерного сколлимированного луча.

Возможность смещения всего лазерного прибора по двум координатам относительно вертикальной оси значительно упрощает центрирование инструмента над опорной геодезической точкой.

Поскольку в конструкции прибора в качестве коллимирующей оптической системы применен нивелир с самоустанавливающейся линией визирования, то при работе с прибором в горизонтальное положение тщательно следует его приводить только в одной координатной плоскости.

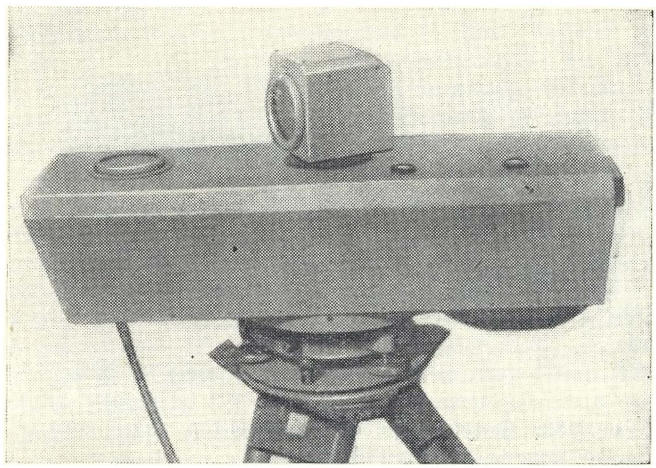


Рис. 131. Лазерный прибор с оптической насадкой

Эта операция осуществляется подъемными винтами треггера по показаниям прецизионного уровня. Осевая система поворота пентапризмы позволяет практически без погрешностей изменять направление вертикального проектирования (вверх или вниз).

При работе на строительной площадке прибор устанавливается на штатив или закрепляется на специальных кронштейнах. Защитный кожух содержит теплоизолирующую прокладку, а также оптические люки для вывода лазерного луча, наблюдения за цилиндрическим уровнем и круговым уровнем нивелира. Для подсветки шкал уровней в приборе предусмотрена подсветка с помощью малогабаритной электрической лампы накаливания. На рис. 131 показан прибор в сочетании с оптической насадкой, осуществляющий поворот луча на 90°. Такая оптическая насадка наполнена на основе пентапризмы и ее конструкция обеспечивает возможность изменения направления горизонтального луча в пределах 360°.

Лазерный прибор вертикального проектирования питается от блока питания лазера (напряжением 220/127 В 50 Гц).

Фотоэлектрический детектор (рис. 132) закрепляется на соответствующих монтажных горизонтах при помощи палетки и удерживается в посадочном цилиндре специальным прижимным кольцом. На корпус его насажена складывающаяся бленда для предохранения фотоэлектрических приемников от прямого попадания солнечного света и засветок от электросварки. Фотоэлектрический детектор весьма прост по устройству, но обладает очень высокой точностью регистрации линейных смещений (от 10—20 мкм на расстояниях в несколько десятков метров). Он содержит светоделительную призму, два конденсора, два фотоприемника (фото-

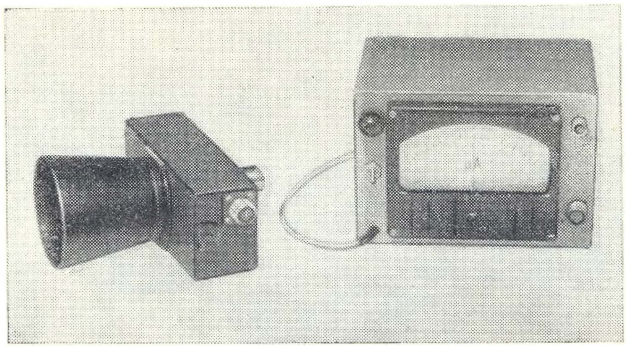


Рис. 132. Фотоэлектрический детектор лазерного прибора

диоды ФД-9к) и электронную схему, включающую в себя устройство выделения мгновенной суммы и разность сигналов, фазовый детектор. Нуль-индикация, а также внецентренность положения детектора по отношению к центру лазерного луча определяются по показаниям стрелочного микроамперметра. Питание фотоэлектрического детектора может осуществляться либо от батареи, либо через вмонтированный в него выпрямитель от сети.

Экспериментальные исследования опытного образца такого лазерного прибора вертикального проектирования показали его высокие точности.

§ 34. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕОДОЛИТЫ

Лазерные приборы, предназначенные для задания и определения направлений, получили название лазерных теодолитов. Они выполнены по образцу геодезических теодолитов и содержат кроме лазера и оптической коллимирующей системы еще наводяще-измерительный узел, который дает возможность направлять лазерный пучок в нужном направлении и измерять (при наведении на марки) горизонтальные или вертикальные углы.

При использовании специальных оптических насадок и добавочного оборудования лазерные теодолиты позволяют задавать и откладывать направления в горизонтальной и вертикальной плоскостях, измерять горизонтальные и вертикальные углы, задавать плоскости с любым углом наклона, разбивать направления в плоскости, перпендикулярной к заданному направлению и т. д.

В настоящее время создано большое число лазерных теодолитов, однако в основу их положены единые принципы, поэтому кратко остановимся только на некоторых их особенностях.

Лазерный теодолит ULIG КР-1 (ПНР) — универсальный геодезический инструмент, содержащий гелий-неоновый лазер мощностью 3 мВт, телескопическую оптическую коллимирующую систему с увеличением 24×, наводяще-измерительный узел для задания и отсчета горизонтальных углов в пределах 360° и вертикальных углов в пределах 30° с точностью 0,1°, визирную трубу, жестко связанную с корпусом прибора, а также алидаду, трегер, трубы для отсчета горизонтального и вертикального кругов [79].

Конструктивно прибор выполнен в виде передающего лазерного устройства, закрепленного на подставке, аналогичной теодолитной. Масса прибора 9 кг, блока питания 5 кг.

Лазерный прибор ULIG КР-4 во многом сходен по конструкции с прибором КР-1. Конструкция КР-4 позволяет заменять передающую трубу на самоустанавливающий компенсатор и превращать теодолит в нивелир. Для точного центрирования инструмента в его конструкции предусмотрен оптический отвес. Новое конструкторское решение в устройстве отсчетных приспособлений позволяет получать отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам в одном шкаловом микроскопе с точностью 0,1°. Масса прибора без блока питания 10 кг.

Лазерный прибор LGN 9136 (ФРГ) [131] выполнен по образцу теодолита, у которого вместо зрительной трубы установлен лазер мощностью излучения 1 мВт с фокусирующей оптикой увеличением 20×. Он содержит также горизонтальный и вертикальный круги, подставку с трегером. Масса прибора 8 кг.

Лазерные приборы VSE 20, LS 3 (Швеция) и другие конструктивно выполнены аналогично рассмотренным выше.

Лазерный теодолит ДКМ-2А фирмы «Керн» (Швейцария), оптическая схема которого приведена на рис. 133, по своей конструкции отличается от других лазерных приборов аналогичного назначения [136].

Корпус лазера у прибора ДКМ-2А отделен от теодолита и устанавливается на одну из ножек штатива или под штативом, а связь лазера с теодолитом осуществляется через жгут волоконной оптики. При введении светового пучка лазера в зрительную трубку (см. рис. 133) он диафрагмируется непрозрачной маркой в виде креста «нитей», расположенных в фокальной плоскости объектива на оптической оси трубы теодолита.

Эта марка хорошо различается на экране на фоне светового пятна и точно фиксирует направление визирной оси теодолита независимо от распределения освещенности в пятне. Светофильтр в оптической схеме теодолита поглощает рассеянный свет лазера и отраженный в сторону окуляра с тем, чтобы не затруднять установку теодолита на визирные цели при помощи обычного (второго в приборе) креста нитей, который виден в поле зрения при изменении фокусировки окуляра.

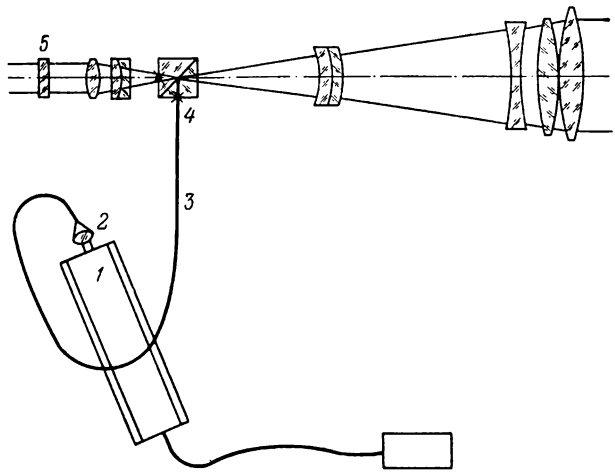


Рис. 133. Оптическая схема лазерного теодолита ДКМ-2А

1 — лазер, *2* — фокусирующая линза, *3* — световвод, *4* — марка, *5* — светофильтр

Такое конструктивное исполнение прибора не создает никакой дополнительной нагрузки на теодолит и его осевые пары, луч лазера точно совпадает с оптической осью зрительной трубы, устойчивость светоделительной призмы значительно лучше, чем устойчивость лазерных насадок.

К достоинствам описываемого лазерного теодолита следует отнести и те факторы, что проекция крестовидной марки обозначает точку визирования однозначно и точно, в приборе исключены ошибки визирования из-за влияния температурных уходов самого лазерного луча, визирная линия инструмента может быть найдена в любой точке лазерного луча без участия наблюдателя у инструмента. Последнее обстоятельство обеспечивает непрерывность работы помощника и создает возможность для постоянного самоконтроля.

Экспериментальные исследования прибора ДКМ-2А показали, что точность визирования лазерным лучом, т. е. точность определения положения визирной оси теодолита при помощи визир-

ных щитков или экранов, составляет около 0,25 мм на расстоянии в 100 м.

Основные технические данные ДКМ-2А:

Увеличение зрительной трубы	30
Световой диаметр объектива, мм	45
Наименьшее расстояние визирования, м	1,7
Мощность лазера, мВт	5
Длина волны излучения, мкм	0,6328
Толщина изображения штрихов марки:	
на расстоянии 50 м, мм	3
на расстоянии 400 м, мм	27
Точность отсчета	0,5″
Дальность действия, м	220
при благоприятных условиях, м	400
Масса комплекта, кг	28,5
Питание прибора	от батареи или сети

Глава VIII

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЕКТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОСАДКАМИ И СМЕЩЕНИЯМИ

§ 35. ВЫСОКОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЦЕНТРИРОВОЧНЫЙ ПРИБОР

При монтаже технологического оборудования производственных и научных объектов часто возникает необходимость проектировать точки по вертикали или наблюдать за взаимным плановым положением точек, расположенных на разных уровнях.

Использование для этих целей оптических методов и приборов не всегда обеспечивает требуемую точность и производительность измерений. К тому же из-за неоднородности температурных полей воздуха в зоне работ возможно искривление и дрожание оптического луча, что существенно снижает точности измерения и ограничивает возможности применения таких оптических приборов.

Указанные трудности с успехом могут быть преодолены применением электронного центрировочного прибора [21]. Таким прибором можно выполнять дискретное центрирование двух или более точек, измерять смещения отдельных точек, осуществлять постоянные дистанционные наблюдения за положением элементов конструкции. Измеряют плановые смещения наблюдаемых точек относительно нити отвеса, какой является калиброванная стальная струна.

Отвес при помощи специальной цанги закрепляется в верхней точке, снизу к струне подвешивают груз массой до 5—8 кг. Для демпфирования колебаний груз помещают в сосуд с вязкой жидкостью (например, в состав масел).

Электронный центрировочный прибор (рис. 134) работает на принципе изменения индуктивности двух или четырех соленоидов, намотанных на ферритах, при перемещении между ними ферромагнитной струны, являющейся нитью отвеса.

Прибор состоит из измерительной головки и регистрирующего блока.

Измерительная головка (рис. 135) имеет индуктивный датчик *1*, закрепленный в стакане на калиброванном вкладыше *3* таким образом, чтобы продольная ось каждой из пар соленоидов *2* была совмещена с осью вкладыша. При измерениях вкладыш вставляется в калиброванную втулку *4*, впрессованную в центрируемое отверстие объекта.

Датчик с четырьмя соленоидами позволяет проводить измерения относительно натянутой ферромагнитной струны в двух

плоскостях одновременно в отличие от датчиков с двумя соленоидами, обеспечивающими измерения в одной плоскости.

Катушки индуктивности в датчике включены в мостовую схему, содержащую юстировочные сопротивления и измерительный гальванометр — микроамперметр.

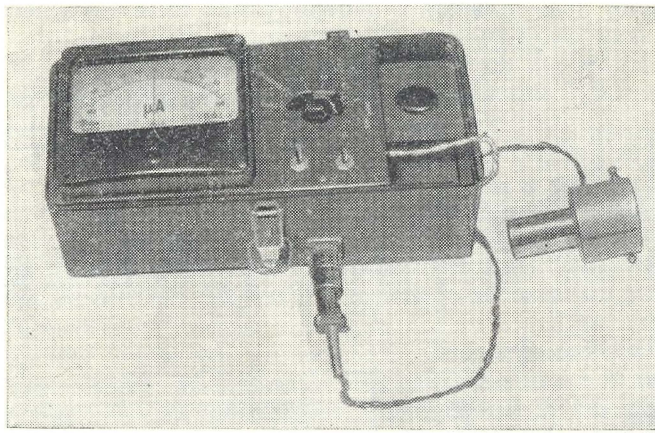


Рис. 134. Электронный центрировочный прибор

Питание индуктивного датчика осуществляется от генератора переменного напряжения частотой 1500 Гц, располагаемого в корпусе регистрирующего блока.

Регистрирующий блок прибора помещен в защитный корпус, на передней панели которого расположены переключатель диапазонов чувствительности прибора (он же и механизм включения прибора) и микроамперметр. Электронный центрир имеет автономное питание от гальванических элементов, располагаемых в корпусе прибора.

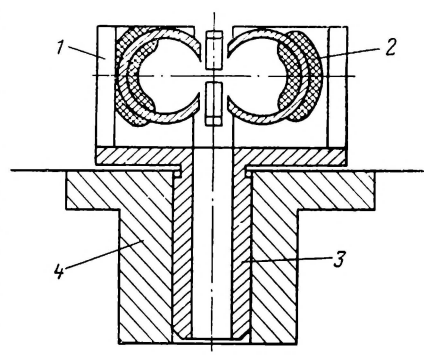


Рис. 135. Конструктивная схема индуктивного датчика центрировочного прибора

При смещении геометрической оси датчика относительно струны изменяется индуктивное сопротивление плеч мостовой схемы прибора. В регистрирующем блоке в фазочувствительном выпрямителе осуществляется сравнивание амплитуды и фазы электрического сигнала, поступающего с датчика, с опорным напряжением генератора, питающего индуктивный датчик.

Амплитуда сигнала от датчика характеризует величину смещения датчика относительно струны, фаза — направление смещения.

Принципиальная электрическая схема электронного центрировочного прибора показана на рис. 136 [22].

Для центрирования двух точек, например геодезических знаков, струну подвешивают в центрируемой точке верхнего знака,

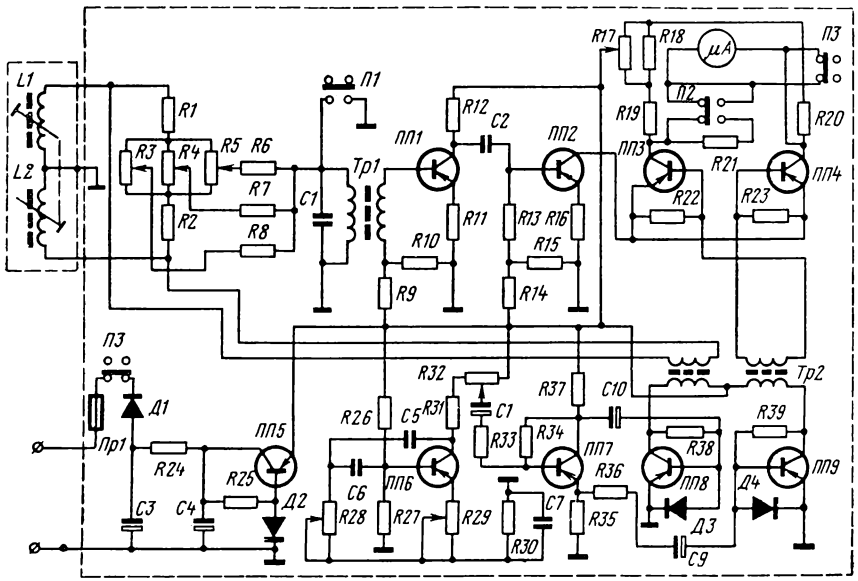


Рис. 136. Электрическая схема центрировочного прибора

груз, осуществляющий натяжение струны, опускают в сосуд с демпфирующей жидкостью. Вкладыш с датчиком вставляют во втулку нижнего знака и ориентируют в заданном направлении. С микроамперметра снимают показание a, затем поворачивают вкладыш во втулке на 180° и снимают второе показание b.

Полуразность отсчетов $\frac{a-b}{2}$ определяет величину смещения знака относительно струны, а полусумма $\frac{a+b}{2}$ соответствует месту нуля датчика.

Диапазон работы датчика прибора и точность измерения взаимосвязаны и определяются в первую очередь рабочим зазором датчика. Чем больше зазор, тем шире диапазон измерения и ниже точность. Поэтому для измерения значительных по величине смещений с высокой точностью следует выбирать датчик с небольшим рабочим зазором, располагая при этом индуктивный датчик на каретке, содержащей микрометренный винт для ее перемещения и индикатор часового типа для снятия отсчетов [46].

При работе с измерительной головкой подобного типа датчик с кареткой перемещают до тех пор, пока стрелка микроамперметра не станет на нуль, отсчет снимают по индикатору.

Электронные центриры такой конструкции предназначены для центрировочных работ, выполняемых после предварительной установки оборудования при значительных отклонениях его от проектного положения.

Экспериментальные исследования электронного центрировочного прибора показали его высокие точности: средняя квадратическая ошибка не превышает 0,01 мм в диапазоне $\pm 2{,}5$ мм.

§ 36. МИКРОНИВЕЛИРЫ С ЭЛЕКТРОННОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

В основу конструкции микронивелиров положено применение электрического уровня. Такие приборы позволяют, выполняя измерения шаговыми методами, вести контроль горизонтального положения поверхностей любых изделий, направляющих путей, станин станков, плоскостей и т. д.

Стремление повысить точность и автоматизировать процесс измерения, перейти от шагового метода измерения к непрерывному, привели в последние годы к разработке и созданию ряда микронивелиров с электронной регистрацией. В качестве чувствительного элемента в которых применяют преобразователи емкостного типа, устанавливаемые на основание микронивелира. Для получения непрерывных измерений преобразователь равномерно перемещают по проверяемой поверхности.

Если проверяемая поверхность непрямолинейна, то основание микронивелира наклоняется и в преобразователе (датчике) происходит изменение электрических параметров, которое преобразуется в изменение частоты электрических колебаний или в изменение напряжения. Это напряжение усиливается, интегрируется и подается на регистратор. Для дискретных измерений в качестве отсчетного устройства используют гальванометр. Для получения непрерывного профиля используют самопишущий прибор, записывающий непрерывную кривую профиля проверяемой поверхности.

Основным рабочим уравнением автоматического метода микронивелирования является уравнение

$$y(x) = \int_0^x \alpha(x)\, dx, \tag{142}$$

где $y(x)$ — отклонение от прямолинейности;

$\alpha(x)$ — текущий угол * наклона основания прибора;

dx — элемент пути вдоль контролируемой линии.

---

* Для малых углов $\alpha \leqslant 2° \div 3°$ можно считать $\operatorname{tg}\alpha = \alpha$, $\operatorname{tg}\alpha$ соответствует первой производной от уравнения исследуемой линии.

Если через $e(x)$ обозначить напряжение, вырабатываемое датчиком и принять скорость перемещения микронивелира равной v, то уравнение (142) преобразуется к виду

$$y(t) = kv \int_0^t e(vt)\, dt, \qquad (143)$$

k — коэффициент пропорциональности, учитывающий связь между углом наклона и параметрами датчика.

Электрические уровни, используемые в автоматических микронивелирах, могут быть реостатные, емкостные и фотоэлектрические [13].

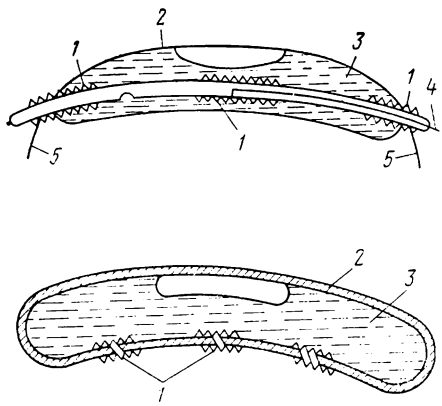


Рис. 137. Преобразователь, разработанный фирмой «Инглиш Электрик» (первый вариант)

В реостатных уровнях электрический преобразователь представляет собой стеклянную или металлическую ампулу с изогнутой поверхностью внутри. Эта поверхность частично залита токопроводящей жидкостью (электролитом), а оставшийся объем заполнен воздухом или паром.

Ампула уровня содержит несколько боковых электродов, с помощью которых при наклоне ампулы преобразователя (на угол до 30′) можно определить изменение сопротивления, пропорциональное углу наклона, электрической цепи между центральным (корпусом прибора) и каждым из боковых электродов.

Такой преобразователь по существу является потенциометром, изменяющим сопротивление при наклоне ампулы уровня за счет того, что при наклоне на какой-то угол один электрод перекрывается электролитом, а другой изолируется от электролита пузырьком воздуха. При горизонтальном положении преобразователя сопротивление его правой и левой частей, симметрично заполненных электролитом, одинаково. Конструкции таких реостатных уровней рассмотрены в [75]—[78] и других работах.

На рис. 137 и рис. 138 показаны конструктивные схемы реостатных уровней, разработанные английской фирмой «Инглиш Электрик» [13].

Ампула уровня, изображенная на рис. 137, представляет собой изогнутую стеклянную колбу *2* с радиусом 305 мм и диаметром 6 мм из стекла марки «Пирекс» с впаянными в нее электродами *4*, *5* из пористой платины *1* и заполненную раствором хлористого лития в спирте *3*. Уровни, представленные на рис. 138, имеют

ампулу бочкообразной формы с внутренним радиусом 4200 мм и содержат изолятор с электродами из губчатой платины. Чувствительность таких преобразователей очень высокая и составляет для ампул первой группы 2″ в пределах измерения 3600″ и 0,2″ в пределах 300″ для ампул второй группы.

Емкостные преобразователи обычно выполняют в виде дифференциального конденсатора, образованного стеклянной ампулой жидкостного уровня и тремя токопроводящими пластинами, две из которых закрепляют на верхней части ампулы по ее краям, а третью располагают в центре нижней боковой поверхности ампулы.

Указанные пластины являются обкладками дифференциального конденсатора, а диэлектриком — стеклянные стенки ампулы и заполняющая ампулу жидкость — этиловый эфир и его пары.

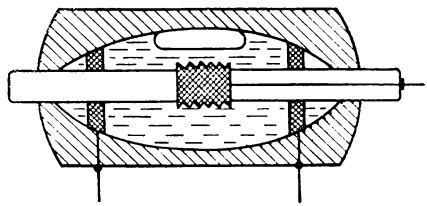


Рис. 138. Преобразователь компании «Инглиш Электрик» (второй вариант)

При наклоне ампулы уровня изменяется диэлектрическая постоянная конденсатора за счет перемещения пузырька воздуха, что в свою очередь изменяет емкость плеч дифференциального конденсатора. При включении такого преобразователя по мостовой схеме питания его от высокочастотного генератора в цепи нижней пластины генератора возникает напряжение рассогласования, амплитуда которого пропорциональна углу наклона, а фаза — направлению наклона.

В амплитудно-фазовом детекторе электронной схемы уровня осуществляется преобразование сигнала и на выходе детектора получают напряжение постоянного тока. Полярность тока определяет направление наклона ампулы, а величина тока — величину угла наклона.

Одной из наиболее удачных конструкций с мостовой схемой включения преобразователя является уровень УЭ-2 [13].

Он имеет следующие технические характеристики.

Предел измерения	Цена деления
25″	0,5″
10″	0,2″
5″	0,1″

В приборе УЭ-2 применен дифференциальный емкостный преобразователь, включенный в мостовую схему, образованную самим дифференциальным преобразователем и двумя катушками индуктивности.

Резонансная собственная частота мостовой схемы у прибора выбрана значительно выше частоты питающего синусоидального

генератора. Такое решение избавило от необходимости точной частотной настройки контура и дало возможность ослабить требования к стабильности частоты генератора. Электрическая принципиальная схема прибора УЭ-2 показана на рис. 139.

Генератор выполнен на лампе Л3 (6Н1П), частота колебаний генератора принята равной 200 кГц. Дифференциальный преобразователь *С1/С2* включен в мостовую схему, составленную из двух индуктивностей (вторичная обмотка трансформатора *Тр1*). Эмиттерный повторитель, собранный на транзисторе *ПП1*, работает в режиме предельно малой входной емкости и служит для согласования преобразователя с детектором.

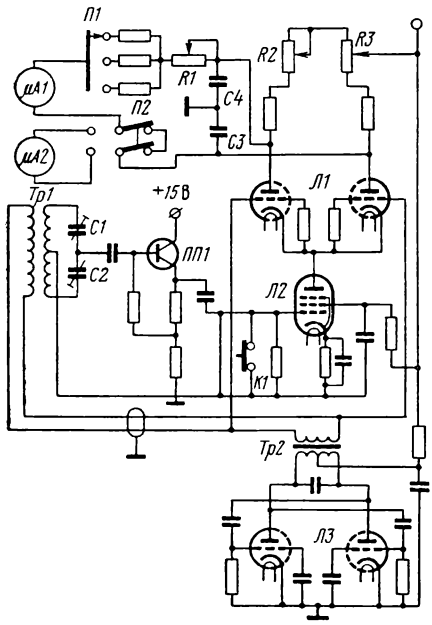


Рис. 139. Принципиальная электрическая схема уровня модели УЭ-2

Амплитудно-фазовый детектор собран на лампах *Л1* (6Н5П) и *Л2* (6Ж3П) по ключевой схеме. Опорное напряжение от генератора подается на сетки детектора через трансформатор *Тр2*.

Напряжение постоянного тока, снимаемое с детектора, фильтруется от высокочастотных составляющих емкостями *С3* и *С4* и поступает на делитель, выполненный на сопротивлениях. Переключение пределов измерения осуществляется переключателем *П1*.

Потенциометр *R3* и кнопка *К1* предназначены для юстировки детектора, нуль уровня изменяют в случае необходимости сопротивлением *R2*, плавная регулировка цены деления уровня и чувствительности достигается при помощи сопротивления *R1*.

Высокочастотное измерение углов наклона можно осуществить также емкостным электронным уровнем, выполненным по схеме, отличающейся от выше рассмотренной [63].

Преобразователь таких уровней представляет собой конденсаторный преобразователь, непосредственно образующий с индуктивностью генератора высокочастотный колебательный контур. При изменении положения ампулы уровня изменяется диэлектрическая проницаемость среды конденсатора и в соответствии с этим перестраивается частота колебаний генератора.

Детектор отношений электронной схемы уровня преобразует изменение частоты колебаний в контуре генератора в изменение напряжения постоянного тока.

Зависимость, отражающая характер таких преобразований электрического сигнала, выражается уравнением [63]

$$f_0 \pm \Delta f = A\left(1 \pm \frac{1}{2}\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0}\right),$$

где f_0 — начальная частота колебаний генератора; Δf — изменение частоты;

$$A = \frac{\sqrt{d}}{2\pi\sqrt{LS}},$$

d — расстояние между пластинами конденсатора; S — площадь обкладки конденсатора; L — индуктивность колебательного контура; ε_0 — начальная диэлектрическая проницаемость; $\Delta\varepsilon$ — изменение диэлектрической проницаемости.

Применение такого преобразователя в автоматическом микронивелире для контроля поверхностей показало высокие точности: определение углов наклона ампулы уровня осуществлялось с погрешностью около 0,1″, а погрешность в измерении прямолинейности не превышала 15 мкм на длине 12 м.

Принцип действия фотоэлектрических уровней основан на сравнивании при помощи фотоприемников двух световых потоков, прошедших через ампулу жидкостного уровня в зоне воздушного пузырька.

При наклоне ампулы уровня за счет перемещения воздушного пузырька происходит затемнение одного из фотоприемников при усилении силы света на другом. Разность световых потоков, преобразованная фотоэлектрической схемой в разность токов, дает информацию о величине и направлении угла наклона. Точность таких уровней [13] может достигать 0,1″.

При применении емкостных уровней в автоматических микронивелирах следует иметь в виду, что они обладают значительной инерционностью перемещения пузырька воздуха, не допускают при выполнении измерений каких-либо ускорений. Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к равномерности скорости перемещения микронивелира, которая, к тому же, не должна превышать величины примерно 1 м/мин. Такими микронивелирами целесообразно осуществлять проверку ограниченных по протяженности направляющих и поверхностей при требуемой высокой точности контроля.

§ 37. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Гидростатическое нивелирование используют в инженерно-геодезической практике для высотной установки и выверки технологического оборудования, измерения осадок инженерных сооружений, передачи отметок через водные преграды. К настоящему

времени физические основы метода гидростатического нивелирования достаточно подробно изучены, создан целый ряд оригинальных по конструкции гидростатических нивелиров.

Как известно, при гидростатическом нивелировании превышение точек определяют непосредственно по поверхности (мениску) жидкости. Существует несколько способов фиксирования высотного положения уровенной поверхности жидкости в сообщающихся сосудах гидронивелиров. Наиболее распространенным из них является визуальный способ, при котором момент контакта измерительного щупа с поверхностью жидкости определяется визуально, а отсчет снимается по барабану микрометра. Такой способ определения уровенной поверхности жидкости обладает достаточно высокой точностью, однако имеет и существенные недостатки: низкая производительность измерений, отсутствие дистанционных измерений, наличие субъективных ошибок наблюдателя, трудоемкость.

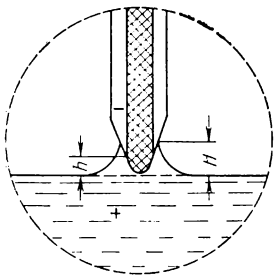


Рис. 140. Электроконтактная схема гидростатического уровня с изолирующим конусом

Поэтому в силу названных причин на ряде современных инженерных объектов, где по условиям труда человеку в период работы физических установок объекта находиться нельзя, например на ускорителях заряженных частиц, использование гидростатических систем возможно только при условии полной автоматизации процесса измерения.

Автоматизация определения положения уровенной поверхности жидкости возможна при применении электроконтактного и фотоэлектрического способов фиксации.

Электроконтактный способ фиксации нашел применение в гидронивелирах с водяным и ртутным заполнением, при этом жидкость в гидронивелирах должна быть токопроводящей. В приборах с ртутным заполнением с течением времени на поверхности контактного щупа образуется пленка окиси ртути и с момента появления такой пленки точность измерения резко падает. Заполнение гидростатической системы водой, содержащей соли для обеспечения токопроводимости, вызывает необходимость более строго учитывать температурное состояния жидкости в сосудах с целью получения высокой точности измерения превышений. К тому же с течением времени из-за воздействия электрического тока наступает коррозия верхней части конуса щупа и точность измерения также падает.

Для повышения точности измерений верхняя часть конусного наконечника щупа может быть выполнена в виде изолятора (например, из органического стекла), высота которого h меньше высоты H мениска, образующегося в момент контакта конца щупа и уровня жидкости (рис. 140) [15].

С течением времени электропроводная часть щупа также может подвергаться коррозии, однако это не влияет на точность измерения, так как образование мениска происходит лишь в момент контакта изолятора и жидкости.

Другим способом борьбы с коррозией наконечника щупа является включение в электроконтактную гидростатическую систему устройства, переключающего полярность питания электрического указателя. Такое устройство выполнено в виде трех поляризованных электромагнитных реле, в цепь одного из которых включены емкости, служащие для запоминания знака потенциала, поданного

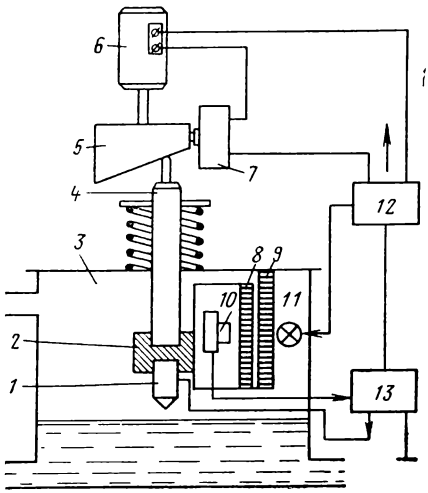


Рис. 141. Схема гидронивелира электроконтактного типа

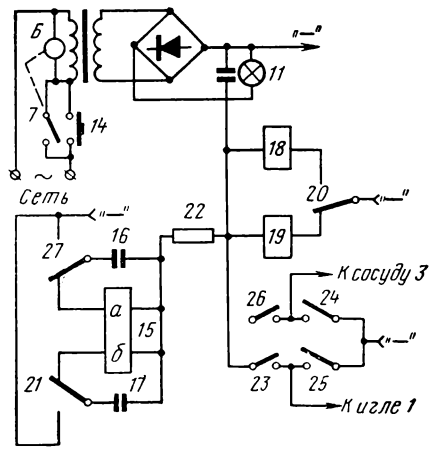


Рис. 142. Электрическая схема управления гидронивелиром с изменяемой полярностью напряжения

на щуп, а два других реле включены в измерительную цепь гидростатической системы [19].

Наличие в схеме управления поляризованного реле совместно с емкостями позволяет автоматически чередовать полярность потенциала, подаваемого на щуп, при каждом очередном замере. Смена полярности потенциала щупа позволяет снизить электрокоррозию.

В высокоточных автоматических гидростатических системах дистанционное определение величины хода контактного щупа до соприкосновения с поверхностью жидкости достаточно просто и надежно может быть осуществлено с применением фотоэлектрических датчиков.

На рис. 141 приведена принципиальная схема гидростатического датчика электроконтактного гидронивелира с дистанционной системой счета информации [19].

Устройство содержит сосуд *3*, внутри которого помещается щуп *4* с закрепленной на нем посредством изолятора *2* иглой *1*

электрического указателя. Эксцентриковый кулачок *5*, укрепленный на оси электродвигателя *6*, приводит в движение щуп *4*.

Осветитель *11* и фотоприемник *10* с неподвижной *9* и подвижной *8* растворовыми пластинами образуют фотоэлектрический датчик, дающий информацию о величине пути перемещения щупа. Фотоэлектрический датчик при перемещении щупа вырабатывает определенное число импульсов, подсчитываемое счетчиком *13*. Питание системы осуществляется от блока питания *12*, а концевой выключатель *7* служит для отключения цепи питания электродвигателя *6* по окончании цикла измерения. Запуск системы в работу производится кнопкой *14* (рис. 142).

Электрическая схема управления гидронивелиром приведена на рис. 142.

Поляризованное реле *15*, имеющее обмотки *а* и *б*, и конденсаторы *16*, *17* являются элементами запоминания знака потенциала иглы *1*, а электромагнитные реле *18* и *19* являются исполнительными элементами системы.

При нажатии на пульте управления кнопки *14* за счет работы двигателя щуп *4* (см. рис. 141) начинает опускаться вниз. При этом с фотоприемника *10* на вход счетчика *12* поступают импульсы. В момент касания иглой *1* поверхности жидкости из-за разности потенциалов между рабочей жидкостью и иглой формируется электрический импульс, осуществляющий запирание счетчика.

Величина l перемещения щупа от нулевого (крайнего верхнего) положения до момента снятия импульса с иглы *1* определится как $l = n\delta$, где n — число импульсов, зафиксированных на счетчике, δ — цена одного импульса.

При нажатии кнопки *14* получает питание также и обмотка реле *19* через контакт *21* реле *15*. Реле срабатывает и конденсатор *17* контактами *21* этого реле подключается к источнику постоянного тока через резистор *22*. Конденсатор *13* (см. рис. 144) заряжается до напряжения источника питания.

Контакты *23* при этом подают положительный потенциал источника питания на иглу *1*, а контакты *24* — отрицательный потенциал на корпус сосуда *3*.

По окончании одного цикла измерения кулачок *5*, совершив один полный оборот, размыкает концевым выключателем *7* питающую цепь устройства. Реле *19* возвращается в исходное состояние, снимая потенциалы с корпуса сосуда *3* и иглы *1* размыканием своих контактов *23* и *24*.

Контакт реле *19* отключает заряженный конденсатор *17* от источника питания и подключает его параллельно обмотке *а'* реле *15*. Якорь реле при этом перебрасывается в другое состояние, подготовляя контактом *20* цепь срабатывания реле *18*.

По окончании разряда конденсатора *17* якорь реле остается в прежнем положении и тем самым обеспечивается подача на иглу *1* потенциала противоположного знака относительно корпуса сосуда *3*.

При очередном нажатии кнопки *14* в работу вступает реле *18*. Контактом *25* оно подает на иглу отрицательный потенциал источника питания, а контактом *26* — положительный потенциал на корпус *3* прибора.

Контакт *27* подключает к источнику питания конденсатор *16* и последний заряжается.

По окончании цикла измерения реле *18* возвращается в исходное состояние, с корпуса и иглы потенциал снимается, а конденсатор *16* своим разрядным током через обмотку *а* реле *15* возвращает его в исходное состояние и контактом *20* подготовляет цепь срабатывания реле *19* для очередного замера.

Средняя квадратическая ошибка в определении высотного положения поверхности жидкости электроконтактными устройствами составляет около 10 мкм.

Известны гидростатические нивелиры, в которых фиксация момента касания щупа с поверхностью жидкости дистанционно и автоматически определяется при помощи света. Причем подвижный щуп может быть выполнен в виде цилиндрического световода, заточенного на конце под углом полного внутреннего отражения света, с осветителем, установленным над световодом, и фотоприемником, расположенным под уровнем рабочей жидкости [70]. Разработаны конструкции, где со щупом измерителя уровня связан сильфон, сообщающийся с внутренним объемом сосуда через капилляр из прозрачного материала, укрепленный на щупе как наконечник и снабженный фотоэлектрическим датчиком, регистрирующим появление жидкости в капилляре [99].

Устройства первого типа обеспечивают точную регистрацию в случае образования заполняющей сосуд жидкостью положительного мениска в момент соприкосновения с ней заостренного световода.

Устройства второго типа могут применяться также с жидкостями, относящимися к несмачивающим, или с непрозрачными жидкостями.

Принципиальная схема гидростатического датчика с капиллярным регистратором показана на рис. 143 [99].

Особенностью конструкции такого датчика является наличие капилляра и сильфона *15*, размещенных внутри стакана с рабочей жидкостью.

В корпусе *1* каждого из сообщающихся сосудов, заполненных рабочей жидкостью, расположены подвижный шток *6*, к которому прикреплен прозрачный наконечник *14* с капиллярным отверстием. Электродвигатель *3* посредством кулачка *5* осуществляет привод штока *6*. Фотоэлектрический датчик *7* величины перемещения штока *6* кинематически связан со штоком *6* посредством зубчатого зацепления, включающего в себя рейку *17* и шестерню *16*.

Источник света *13* и фотоприемник *10* жестко укреплены на наконечники *14* и могут перемещаться вместе с ним при перемещении штока *6*.

Блок питания *4* осуществляет питание электродвигателя *3* через выключатель *2*, управляемый конечным выключателем *11*.

Регистрирующее устройство *18* и датчик температуры *12* предназначены для учета влияния температурных факторов на точность гидростатического нивелирования.

При вращении от электродвигателя *3* эксцентрикового кулачка *5* шток *6* перемещает наконечник *14* в направлении к уровню

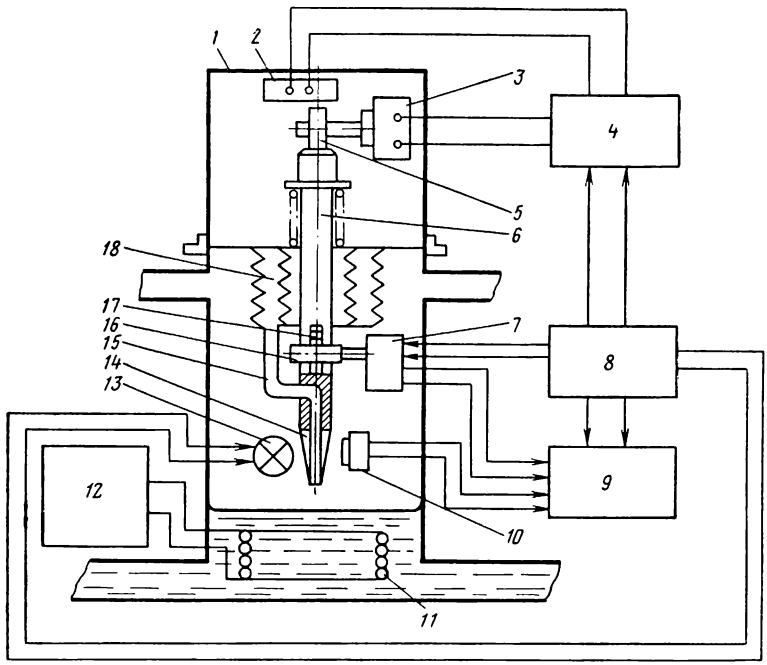


Рис. 143. Гидронивелир с капиллярным регистратором

жидкости. Датчик *7* при этом генерирует электрические импульсы, число которых пропорционально величине перемещения штока *6*.

При своем перемещении шток *6* растягивает сильфон *15*, создавая в нем разрежение. При этом через наконечник *14* и воздухопровод (капилляр) всасывается воздух. В момент соприкосновения наконечника *14* с поверхностью жидкости последняя начинает подниматься по капилляру вверх и пересекает световой поток от источника света *13* на пути к фотоприемнику *10*. В этот момент с фотоприемника *10* в блок *8* и *9* обработки информации поступает импульс, прекращающий отсчет величины перемещения штока *6*.

Кулачок *5*, совершив полный оборот, выводит наконечник *14* из жидкости и возвращает шток *6* в исходное верхнее нулевое положение. При возврате штока к исходному положению сильфон *15* сжимается и избыточным давлением воздуха в сильфоне

на воздухопроводе через наконечник *14* вытесняется жидкость. Концевой выключатель *11* при полном обороте кулачка *5* отключает питание электродвигателя *3*.

Рассмотрим принцип действия гидростатического датчика, основанного на регистрации изменения условий отражения света в световоде при его погружении в жидкость.

На рис. 144 изображена упрощенная функционаяльная схема, поясняющая принцип действия датчика и измерительной системы

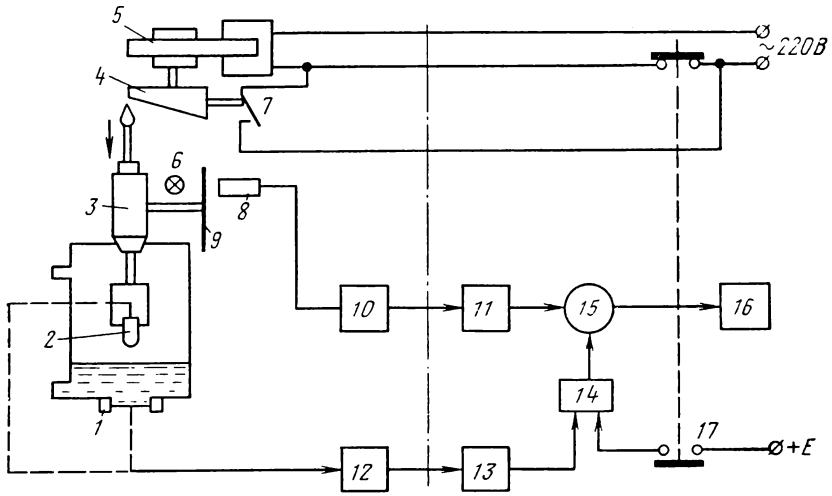


Рис. 144. Блок-схема гидростатической системы с дистанционным управлением

при измерении высотного положения уровенной поверхности жидкости в одном датчике.

При нажатии кнопки *17* на пульте управления осуществляется запуск системы. Нижней парой контактов осуществляется переброс триггера *14* в такое состояние, при котором клапан *15* открывается. Одновременно через верхнюю пару контактов подается питание на электродвигатель *5*. При вращении вала электродвигателя кулачок *4*, содержащий боковой выступ, замыкает контакт *7*, самоблокируя цепь питания электродвигателя, и перемещает вниз шток индикатора *3* часового типа. Этот шток индикатора в свою очередь сообщает вращательное движение кодирующему диску *9* со щелями. Осветитель *6* и фотодиод *8* при вращении диска вырабатывает электрические импульсы, число которых пропорционально величине перемещения штока.

Счетные импульсы, усиленные усилителем *10* и сформированные формирователем *11*, через клапан *15* направляются в счетчик импульсов *16*, где и фиксируются.

На конце штока *3* установлен световод *2* с вмонтированной внутрь его лампочкой. Световод заточен в нижней части на конце

под углом полного внутреннего отражения. В момент касания световодом поверхности жидкости условия полного внутреннего отражения нарушаются и засвечивается фотодиод *1*, расположенный на дне стакана гидростатического датчика. Фотодиод *1* выдает импульс, который после усиления усилителем *12* и формирования формирователем *13* поступает на второй вход триггера *14*.

Этот импульс переводит триггер в исходное состояние и тем самым запирает счетчик. На счетчике импульсов оказывается зафиксированным число импульсов, соответствующее величине хода световода от крайнего верхнего положения до уровня жидкости в сосуде.

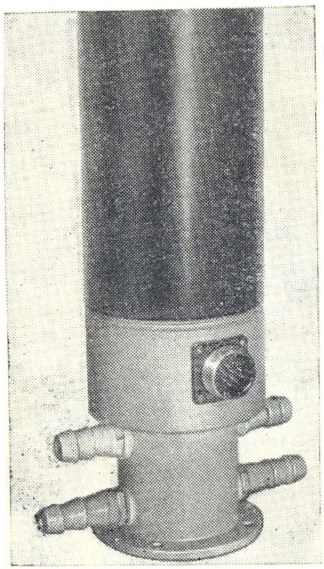


Рис. 145. Общий вид гидростатического датчика прибора СГН-27Д

Кулачок *4*, совершив полный оборот, приводит все системы датчика в исходное для работы состояние.

Для высокоточного дистанционного измерения превышений между точками в условиях закрытых помещений может быть использована система гидростатического нивелирования СГН-27Д.

Такая система оснащается гидростатическими датчиками (рис. 145) электроконтактного типа или датчиками со световодами полного внутреннего отражения, аналогичными вышерассмотренным. Блок управления системы выполнен по функциональной схеме, соответствующей схеме, приведенной на рис. 144, и позволяет дистанционно для измерений подключать любой датчик системы.

Датчики, число которых может достигать 27, соединены между собою шлангами. Их устанавливают на контролируемых точках объекта. Датчики соответствующими кабелями подключены к распределительным коробкам, устанавливаемым в зоне контролируемого объекта. Каждая распределительная коробка рассчитана на подключение к ней трех датчиков.

В качестве рабочей жидкости, заполняющей шланги системы, может быть использована дистиллированная вода с добавкой 0,1% формалина или спирта, или жидкость, проводящая электрический ток. Выбор жидкости определяется типом используемых датчиков. Все органы управления системой СГН-27Д выведены на лицевую панель блока управления. В блоке управления имеется декатронный счетчик импульсов (рис. 146).

Диапазон измеряемых превышений системой СГН-27Д составляет 4 мм от некоторого среднего уровня.

Средняя квадратическая ошибка в определении уровня жидкости 20 мкм. Время одного замера 30 с. Потребляемая мощность 80 Вт. Питание системы осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В с частотой 50 Гц.

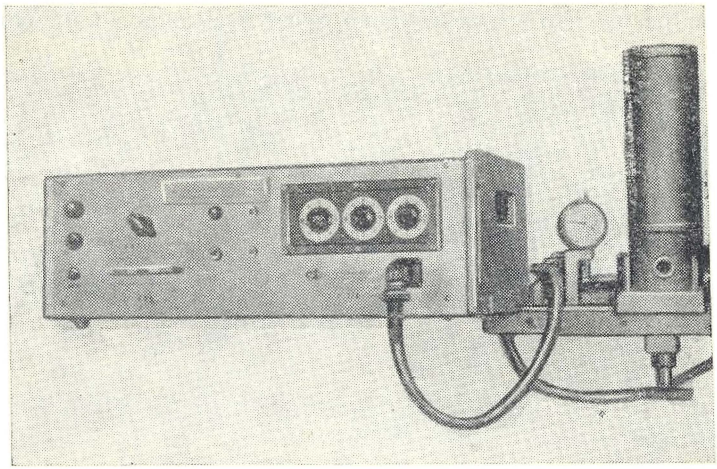


Рис. 146. Общий вид блока управления гидростатической системы СГН-27Д

§ 38. ИЗМЕРИТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ С МУАРОВЫМ ДАТЧИКОМ

При выполнении инженерно-геодезических измерений при изучении осадок и смещений различных строительных конструкций условия наблюдения часто оказываются затруднительными, т. е. резко отличаются от обычных, в которых выполняются высокоточные геодезические измерения.

Такие специфические условия присущи, например, гидротехническим сооружениям, где значительную часть измерений выполняют в смотровых потернах, часто наклоненных под различным углом к горизонту.

С целью упрощения измерений и повышения их точности при изучении осадок и деформаций в весьма сложных условиях применяют ряд новых измерительных средств, одним из которых является измеритель линейных смещений с муаровым датчиком и электронным устройством для дистанционного управления.

Такой прибор, разработанный в МИИГАиК, позволяет с высокой точностью измерять перемещения одного элемента конструкции или изделия относительно другого.

В качестве чувствительного элемента в приборе для измерения линейных смещений использован муаровый датчик, состоящий

из двух стеклянных пластин с нанесенными на них плоскопараллельными линейными решетками (растрами) (см. § 13).

В описываемом приборе решетки имеют шаг $t = 0{,}2$ мм.

Общий вид измерителя линейных смещений с муаровым датчиком и блоком дистанционной регистрации показан на рис. 147.

Датчик *1* муаровых полос закреплен на основании *2* прибора таким образом, что верхний растр имеет возможность посредством

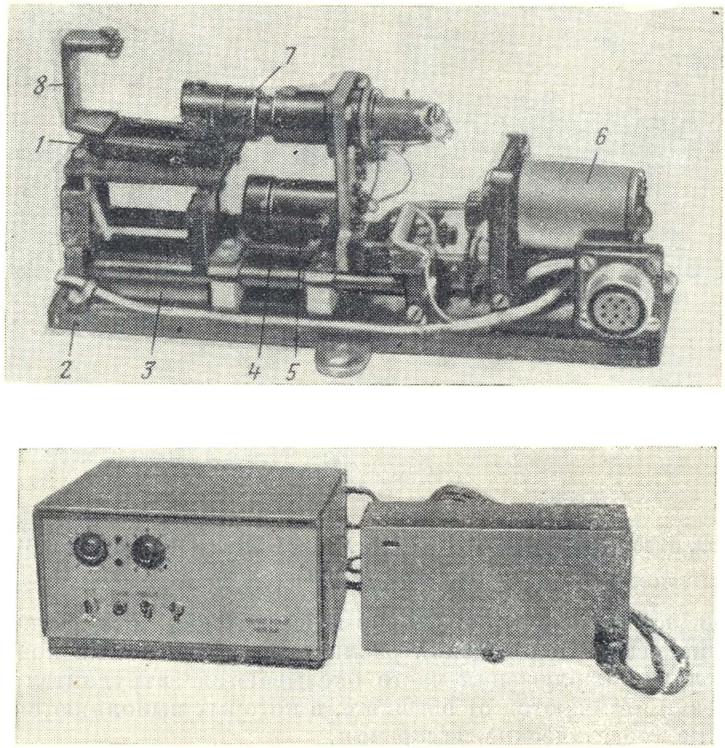


Рис. 147. Муаровый измеритель смещений

поводка *8* смещаться по углу относительно нижнего неподвижного растра вокруг их общей оси.

При вращении ходового винта *4* от электродвигателя *6* ДИД-2ТА каретка перемещается по направляющей *3*. Каретка содержит осветитель *7* и фотоэлектрическую приемную головку *5*.

Свет от лампочки накаливания осветителя *7* проходит систему конденсорных линз, поворотную призму и, сфокусировавшись ими в плоскости растров, поступает расходящимся пучком на фотоприемную головку *5*.

При пересечении световым потоков двигающейся каретки кадрового окна растров фотоприемное устройство вырабатывает

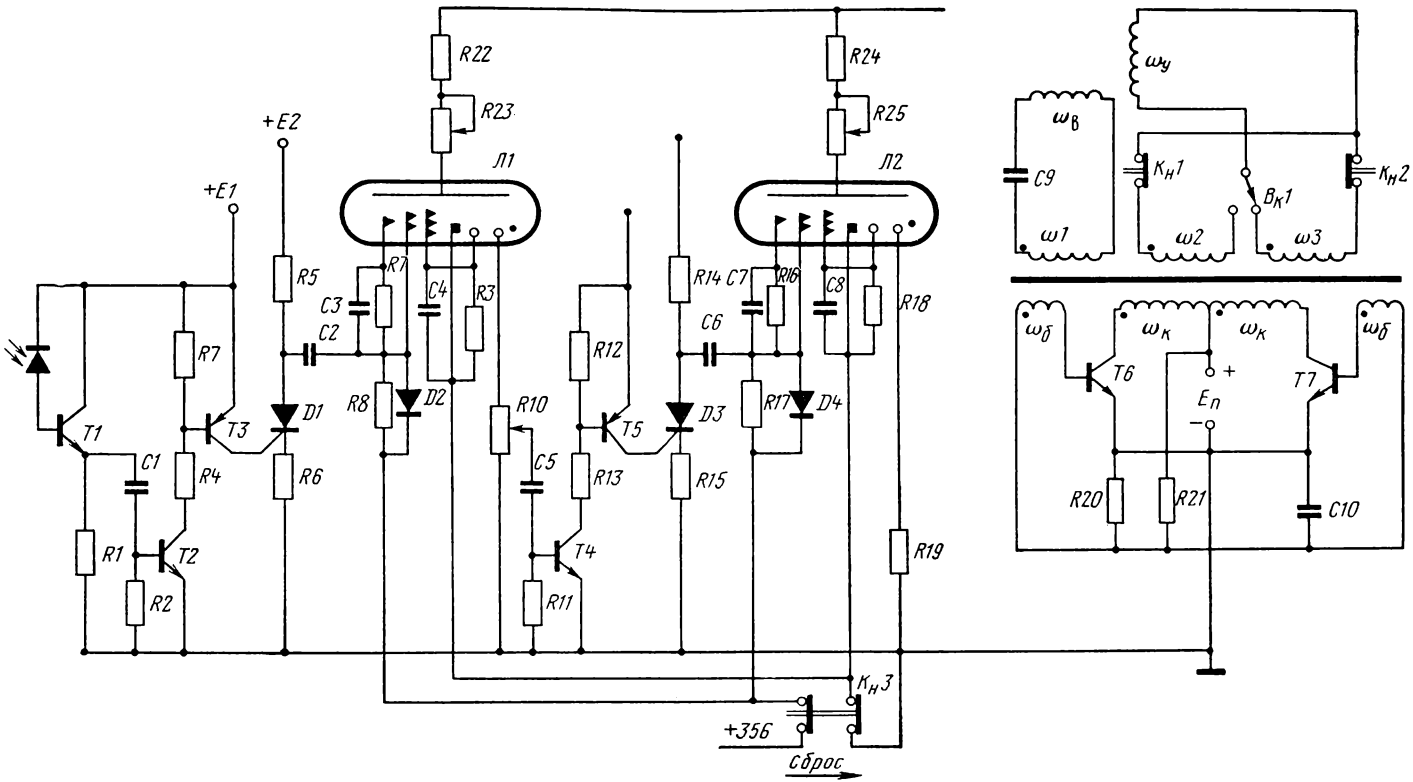


Рис. 148. Электрическая схема измерителя линейных смещений с муаровым датчиком

определенную последовательность электрических импульсов, число которых соответствует числу муаровых полос в кадровой рамке в каждый конкретный момент времени.

Для ограничения хода каретки справа и слева от ходового винта на корпусе прибора установлены микровыключатели, срабатывающие при подходе каретки к одному из крайних положений и размыкающие цепь питания электродвигателя.

Управление перемещением каретки, включая изменение направления ее движения (реверс), осуществляется с пульта управления включением соответствующих тумблеров.

Размеры кадровой рамки растров и величина хода каретки при измерениях выбираются такими, чтобы за один проход каретки световой луч от осветителя просканировал кадровую рамку по всей ее длине.

Питание электродвигателя напряжением 36 В и частотой 400 Гц осуществляется дистанционно с пульта управления от генератора переменного напряжения.

Подсчет числа импульсов от фотоэлектрического датчика производится также дистанционно декатронным счетчиком импульсов.

Электрическая схема блока управления прибора приведена на рис. 148.

Она содержит генератор для питания электродвигателя, выполненный на транзисторах *Т6* и *Т7* и трансформаторе *Тр1*, и счетчик импульсов, собранный на транзисторах *Т1—Т5* и двух декатронах *Л1*, *Л2* типа ОГ-3.

На вход транзистора *Т3* и предусилителя поступают счетные импульсы. Каждый импульс открывает транзистор *Т3* и к управляющему электроду тиристора *Д1* прикладывается напряжение $+E1$. Тиристор открывается и отрицательный импульс с конденсатора *С2* поступает на вход схемы запуска декатрона *Л1*. С резистора *R10* импульсы положительной полярности подаются на вход второго счетчика каскада, который работает аналогично.

Приведение показаний счетчика к нулю перед взятием отсчета осуществляется нажатием кнопки КН3, вынесенной на переднюю панель пульта управления.

При выполнении инженерно-геодезических работ по измерению линейных смещений конструктивных элементов или деформаций сооружений подвижная пластина муарового датчика жестко скрепляется тягой или струной с исследуемым конструктивным элементом, а сам измеритель смещений надежно закрепляется на устойчивом фундаментном основании или геодезическом знаке.

Результаты исследования измерителя линейных смещений с муаровым датчиком показали, что при выбранном шаге растра 0,2 мм средняя квадратическая ошибка в определении смещений не превышает 0,13 мм.

Выбирая нужным образом шаг решеток, можно задавать различные значения числа муаровых полос в кадровой рамке при одних и тех же углах взаимного разворота растров датчика.

Глава IX

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ТОЧНОСТЬ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 39. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВИЗИРНОЙ ЛИНИИ

Современные методы высокоточных инженерно-геодезических измерений в той или иной мере связаны с оптическим визированием или с применением оптического (в том числе и лазерного) излучения для задания опорных геодезических линий или плоскостей. Одним из главных источников погрешностей при выполнении измерений с использованием оптического луча являются погрешности из-за влияния атмосферы. Знание характера и законов распространения оптического излучения дает возможность при соответствующих условиях учесть возможные погрешности и добиться высокой точности измерения.

Исследованию законов распространения оптического луча в свободной атмосфере посвящено большое количество работ, установлены некоторые общие закономерности, позволяющие для ослабления влияния внешних условий выбирать соответствующие время и условия наблюдения.

Большое количество инженерно-геодезических работ выполняется в специфических условиях, в том числе в закрытых помещениях, где условия распространения оптического излучения отличаются от распространения в открытой атмосфере. Эти особенности определяются расположением строительных конструкций, технологического оборудования, коммуникаций, наличием в помещении тепловыделяющих элементов. Часто при выполнении высокоточных измерений в условиях открытой площадки визирный луч распространяется над массивными металлоконструкциями, например направляющими путями, где существуют свои законы теплообмена с окружающей средой и общепринятые методы учета влияния внешних условий оказываются неэффективными.

Основными факторами внешних условий, определяющими нестабильность в пространстве опорной линии, заданной оптическим излучением, являются рефракция и температурная турбулентность атмосферы.

Под рефракцией понимают отклонение оптического луча от его прямолинейного распространения, обусловленное градиентом показателя преломления, в направлении, перпендикулярном к направлению распространения луча.

Геодезическую рефракцию принято подразделять на вертикальную и горизонтальную.

Градиент показателя преломления приземных слоев атмосферы, как известно, зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется градиентом температуры и давления и меньше зависит от градиента влажности воздуха.

Если на пути распространения луча среда имеет температурный градиент ∇T (горизонтальным градиентом давления всегда можно пренебречь), то для рефракции в системе прямоугольных координат для одной проекции траектории на координатную плоскость можно записать [65]

$$\left.\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \delta \\ \frac{d\delta}{dx} &= \frac{L^2}{L^2+h^2}\nabla T_y \end{aligned}\right\}, \tag{144}$$

где δ — угол между проекцией на плоскость xy касательной к лучу и осью x; L — длина светового луча; h — превышение конца светового луча над его началом; ∇T — составляющая градиента показателя преломления воздуха по оси y.

Это уравнение справедливо в предположении, что ось x совмещена с проекцией на координатную плоскость xy прямой, соединяющей начало и конец светового луча.

Из решения указанных уравнений относительно δ получена [64] общая формула для поправки за рефракцию в направление для начальной точки луча

$$\delta_н = -\frac{L^2}{L^2+h^2}\int_0^L \left(1-\frac{s}{L}\right)\nabla T_y(s)\,ds, \tag{145}$$

где s — расстояние от начала до текущей точки светового луча.

При одинаковой высоте начала и конца луча

$$\delta_н = -\int_0^L \left(1-\frac{s}{L}\right)\nabla T_y(s)\,ds, \tag{146}$$

для конца луча

$$\delta_к = \int_0^L \frac{s}{L}\nabla T_y(s)\,ds. \tag{147}$$

Общая формула линейной поправки σ за рефракцию (в одной координатной плоскости) получается из решения уравнения (145) и имеет вид [67]

$$\sigma = \frac{(x-L)L}{L^2+h^2}\int_0^x \delta\nabla T_y(s)\,ds + \frac{Lx}{L^2+h^2}\int_x^L (s-L)\nabla T_y(s)\,ds, \tag{148}$$

где x — расстояние от начальной точки луча до точки, для которой определяется поправка.

Эти формулы были получены для условий, отражающих специфику выполнения инженерно-геодезических измерений в закрытых помещениях. Рабочие формулы для угловых и створных измерений можно получить из вышеприведенных формул методами численного интегрирования и сводка их приведена в работе [64].

Точность определения поправок за рефракцию существенно зависит от количества точек, в которых производится измерение температурных градиентов.

Как следует из изложенного при выполнении высокоточных инженерно-геодезических измерений в ряде случаев, зная температурные градиенты, можно рассчитывать величину поправки за рефракцию.

Величина температурного градиента может быть примерно рассчитана по измеренным величинам метеопараметров (температуры, давления, влажности) или непосредственно измерена специальным прибором — высокоточным термическим градиентомером.

Особое значение приобретают вопросы учета влияния внешних условий при работе с применением лазеров, поскольку протяженность контролируемых участков при этом значительно возрастает и помимо рефракции на точность измерений в значительной степени сказывается влияние температурной турбулентности атмосферы.

Основное влияние температурной турбулентности кроме уменьшения когерентности и рассеяния излучения ОКГ заключается в беспорядочном отклонении пучка и изменении интенсивности. При больших расстояниях между передатчиком и приемником «дрожание» пучка лучей может быть таким, что излучение частично или полностью не будет попадать в апертуру приемника. Это вызывает уменьшение полезного сигнала на приемнике, связанное с нежелательной амплитудной модуляцией, и является источником погрешностей измерения.

Относительное изменение показателя преломления среды может быть выражено в виде функции переменной, зависящей от положения и времени [133]

$$\Delta n = \Delta n\,(x,\ y,\ z,\ t). \tag{149}$$

Такие переменные обычно выражаются в величинах корреляционных функций и корреляционных параметров. Изменение показателя преломления Δn среды удобно выразить через корреляционное расстояние $L_к$ и корреляционное время $T_к$. Оба параметра при этом определятся в величинах степени связи пространственной и временно́й корреляционных функций Δn [133]

$$\left.\begin{aligned} C_{12}(\rho) &= \langle\, \Delta n\,(r)\,\Delta n\,(r+\rho)\,\rangle = \langle\, \Delta n_1 \cdot \Delta n_2\,\rangle \\ R_{12}(\tau) &= \overline{\Delta n_1\,(t)\,\Delta n_2\,(t+\tau)}. \end{aligned}\right\}. \tag{150}$$

Угловые скобки в формулах (150) указывают совокупность средних значений, а черта сверху подразумевает среднее значение во времени.

Среднее квадратическое изменение показателя преломления $C11\ (0) = \langle \Delta n^2 \rangle \equiv \langle \Delta n\ (r)\ \Delta n\ (r) \rangle$ уменьшается с высотой h, а корреляционное расстояние $L_к$, наоборот, увеличивается. Соответствующие зависимости были эмпирически определены в [133] и имеют вид

$$\left.\begin{aligned} \langle \Delta n^2 \rangle &= 10^{-12} e^{-h/1600} \\ L_к &= \frac{0{,}4h}{1 + 10^{-2}h} \end{aligned}\right\}. \tag{151}$$

При рассмотрении распространения пучка ОКГ вдоль какого-либо направления (например, x-направления) в каждой точке среды необходимо учитывать и изменение показателя преломления в окрестности указанных точек. Для упрощения можно принимать в расчет корреляционные расстояния $L_{к\,x}$ и $L_{к\,m}$ вдоль двух ортогональных направлений — в направлении распространения пучка и в направлении, перпендикулярном к нему.

Если весь путь L распространения пучка ОКГ (от передатчика до приемника) условно разбить на интервалы $L_{к\,\lambda}$, то, аппроксимируя внутри указанных интервалов непрерывное изменение показателя преломления дискретным шагом от $1 + \Delta n$ до 1 (так как $n \approx 1$) и соответствующие углы рефракции от θ до $\theta + \Delta\theta$, для небольших приращений получим [133]

$$\Delta\theta_к = \Delta n \operatorname{tg} \theta, \tag{152}$$

где $\theta_к$ — отклонение пучка внутри одного интервала $L_{к\,x}$.

Можно принять [133] $\operatorname{tg} \theta = L_{к\,x}/L_{к\,m}$ и соотношение (152) привести к виду

$$\Delta\theta_к = \Delta n \frac{L_{к\,x}}{L_{к\,m}}. \tag{153}$$

Средняя квадратическая ошибка изменения угла внутри интервала $L_{к\,x}$ за влияние температуры будет

$$\overline{\Delta\theta_к^2} = \overline{\Delta n^2} \left(\frac{L_{к\,x}}{L_{к\,m}}\right)^2. \tag{154}$$

На пути длиной L пучок ОКГ пройдет $\frac{L}{L_{к\,x}}$ интервалов. Учитывая, что отклонения не коррелируются от одного интервала к другому, запишем в окончательном виде выражение для $\langle \Delta\theta_к \rangle^2$ [133]

$$\langle \Delta\theta_к^2 \rangle = \frac{L}{L_{к\,x}} \overline{\Delta\theta_к^2} = \overline{\Delta n^2} \frac{L_{к\,x} L}{L_{к\,m}^2}. \tag{155}$$

Если рассмотреть отклонения пучка ОКГ в двух взаимно перпендикулярных направлениях y и z, то

$$\langle \Delta\theta^2 \rangle = \langle \Delta\theta_y^2 \rangle + \langle \Delta\theta_x^2 \rangle = \overline{\Delta n}^2 L_{\text{к}\,x} L \left[\frac{1}{L_{\text{к}\,z}^2} + \frac{1}{L_{\text{к}\,y}^2} \right]. \quad (156)$$

Для изотронной среды

$$L_{\text{к}\,x} = L_{\text{к}\,m} = L_{\text{к}\,y} = L_{\text{к}\,z} = L_{\text{к}}, \quad (157)$$

поэтому для указанного случая

$$\langle \Delta\theta^2 \rangle = \langle \Delta\theta_y^2 \rangle + \langle \Delta\theta_x^2 \rangle = 2\overline{\Delta n}^2 \frac{L}{L_{\text{к}}}. \quad (158)$$

Из анализа соотношений (156), (157) можно сделать вывод, что увеличением апертуры объектива приемных устройств и поперечного сечения лазерного луча (это условие выполняется при коллимировании излучения ОКГ) можно в некоторой степени свести к минимуму вредные явления, связанные с хаотическим дрожанием пучка. Однако полный учет влияния турбулентной атмосферы на точность выполнения геодезических измерений может быть получен только из экспериментальных данных, собираемых непосредственно в тех условиях, где надлежит выполнять геодезические измерения.

Знание законов угловых и линейных флуктуаций луча и их численных значений позволит правильно выбрать условия для измерений и более точно провести оценку их результатов [82].

Измерять угловые и линейные флуктации лазерного луча в атмосфере можно высокоточными оптико-электронными приборами, а обрабатывать результаты измерений методами оптической обработки информации.

§ 40. ВЫСОКОТОЧНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ ГРАДИЕНТОМЕР

Высокоточный термический градиентомер предназначен для измерения градиентов температур воздуха в створе оптического луча при высокоточном геометрическом нивелировании и угловых измерениях. Измерения градиентов температур производят с с целью учета влияния вертикальной или боковой рефракции.

Принцип действия прибора основан на измерении разности температур двух термодатчиков, включенных в мостовую схему. Каждый из пары термодатчиков изменяет свое внутреннее сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды. Таким образом, при расположении термодатчиков в слоях воздуха с разной температурой величина результирующего тока, протекающего через измерительную диагональ электрического моста, соответствует разности температур указанных слоев воздуха. Термодатчики предварительно тщательно отбираются с тем, чтобы при измерениях обеспечивалась линейная зависимость изменения внутреннего сопротивления от изменения температуры окружающей среды.

Конструктивно градиентомер представляет собой совокупность двух элементов — несущей штанги с термодатчиками и измерительного блока (рис. 149). В качестве термодатчиков использованы кремниевые диоды (Д808), специально подобранные по вольт-амперным характеристикам.

Измерительная схема прибора состоит из неравновесного моста, в одну диагональ которого включен источник постоянного напряжения, в другую — гальванометр (рис. 150). Два плеча моста образованы термодатчиками, два других плеча — постоянными проволочными сопротивлениями величиной 2000 Ом. Источником тока служит аккумулятор емкостью 8 А/ч и напряжением 2,5 В. Большая емкость позволяет работать с прибором при одной зарядке аккумулятора в течение 5—6 мес и эталонировать прибор только в начале и конце этого периода.

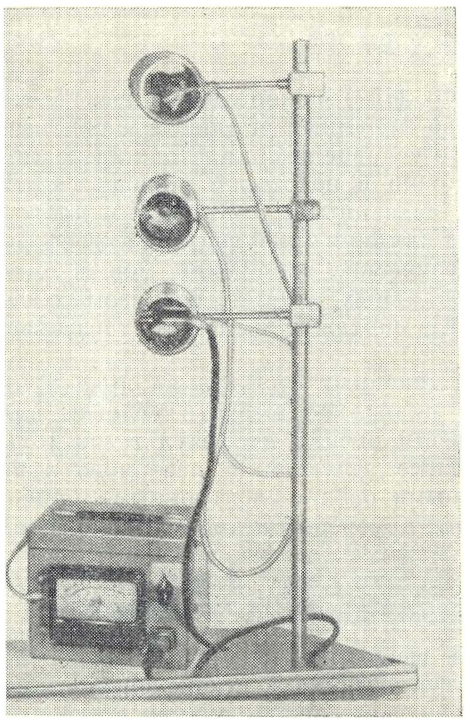


Рис. 149. Высокоточный термический градиентомер

Для измерения градиентов применяется высокочувствительный гальванометр типа М93. При работе в ночных условиях шкала гальванометра освещается двумя лампочками накаливания напряжением 3,5 В, подключаемых к аккумулятору тумблером на передней панели измерительного блока.

Исследования такого градиентомера [48], позволили установить, что параметры пар датчиков в рабочем диапазоне температур (+10° С÷25° С) линейно изменяются с изменением температуры, величины этих изменений невелики и при необходимости они могут быть учтены в виде соответствующих поправок. Рабочая инерционность термодатчиков соответствует примерно 0,2 град/мин, а суточный уход нуля электрической схемы не превышает 0,05° С.

Изменение вертикальных градиентов выполняется в следующей последовательности. Прибор устанавливают на точке, над которой измеряют вертикальный градиент, включают питание и производят калибровку первой пары термодатчиков *1—2*. Устанавливают датчики на заданных высотах и, выждав несколько минут, чтобы

датчики могли принять окружающую температуру, производят отсчет *a* по шкале гальванометра. Меняют местами датчики и через некоторое время производят второй отсчет *b* на шкале гальванометра. Если первый отсчет был, например, в правой части шкалы, то второй будет в левой части. Вычисляют величину градиента, выраженную в делениях шкалы гальванометра как среднее из отсчетов *a* и *b*.

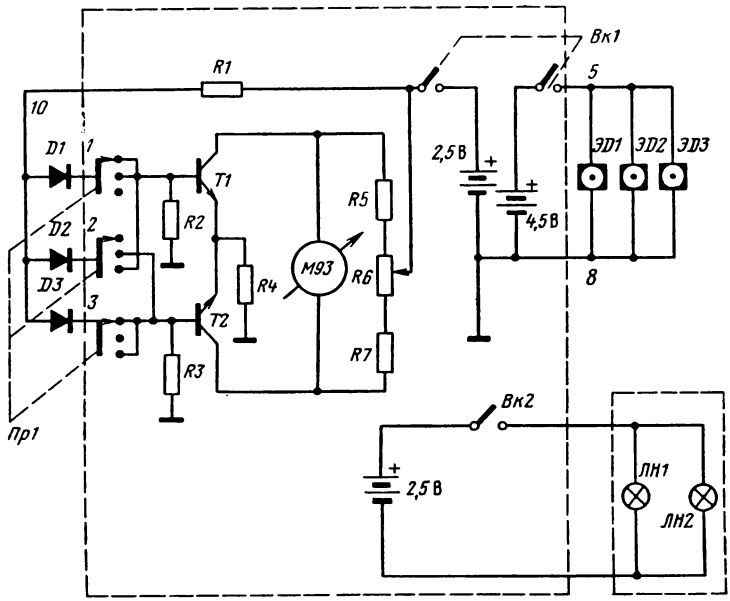


Рис. 150. Электрическая схема термического градиентомера

По таблице градиент переводят в градусы по Цельсию. Таблица перевода отсчетов по шкале в градиент температур составляется по результатам эталонирования.

То же выполняют для двух других пар датчиков *2—3*, *1—3*.

Юстировка прибора включает юстировку гальванометра и юстировку электрической цепи. Юстировка гальванометра производится при отключенном питании и заключается в установке стрелки прибора на нуль шкалы при помощи механического корректора. Юстировка электрической схемы выполняется при включенном приборе. Для этого перед каждым измерением градиента термодатчики располагают как можно ближе друг к другу. Если схема разъюстирована, то отсчетный индекс будет показывать произвольный отсчет по шкале. Изменением величины переменного сопротивления (см. рис. 150) стрелку прибора устанавливают на нуль. Эту операцию выполняют при трех положениях переключателя *Пр1* для каждой пары датчиков градиентомера.

Эталонирование градиентомера выполняют только в условиях измерительной лаборатории с целью определения цены деления гальванометра. Оно состоит в следующем. Датчики помещают в один сосуд с водой и производят регулировку электрической схемы. Затем датчики помещают в различные сосуды с водой. Вода в одном из сосудов подогревается. Температура воды в сосудах измеряется через равные промежутки времени (15—20 мин) синхронно двумя наблюдателями по пяти высокоточным термометрам. Одновременно берут отсчеты по шкале гальванометра. Частное от деления разности температур в сосудах на отсчет по шкале гальванометра дает цену деления шкалы.

Градиентомер данной конструкции при введении соответствующих поправок позволяет измерять температурные градиенты со средней квадратической ошибкой 0,03 градуса, причем точность измерения градиентов не зависит от расстояния между термодатчиками.

§ 41. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ И ФЛУКТУАЦИЙ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Широкое внедрение оптических квантовых генераторов в инженерно-геодезическую практику поставило перед исследователями задачу по изучению влияния условий внешней среды на распространение лазерного излучения в свободной атмосфере при высокоточных геодезических наблюдениях.

Известны различные приборы для регистрации угловых отклонений и угловых флуктуаций оптического излучения. Наиболее удачным в конструктивном отношении является фотоэлектрический угломерный следящий прибор, предложенный в [96].

Такой фотоэлектрический угломерный следящий прибор содержит объектив и следящую оптико-электронную систему с исполнительным органом, выполненным в виде зеркала шлейфового гальванометра, расположенного между объективом и его фокальной плоскостью. Сфокусированный световой поток отражается от зеркала и попадает на фотоумножитель, перед которым расположена тридцатимикронная щель. На шлейф зеркального гальванометра от звукового генератора через суммирующее устройство (уравновешенный мост) подается напряжение несущей частоты $f_н$.

Колебания зеркала совершаются в плоскости, перпендикулярной к щели. Напряжение с нагрузки ФЭУ через усилитель подается на вход фазочувствительного выпрямителя, куда также введено напряжение опорной частоты от звукового генератора.

При положении изображения источника света на середине щели в сигнале с ФЭУ отсутствует частота $f_н$. В случае изменения угла прихода оптического излучения на входе в угломерную систему амплитуда составляющей сигнала с ФЭУ пропорциональна величине смещения изображения от середины щели,

а фаза совпадает или сдвинута на 180° по отношению к фазе опорного напряжения в зависимости от направления рассогласования. Ток на выходе фазочувствительного выпрямителя, осуществляющий поворот зеркала гальванометра в направлении уменьшения рассогласования, пропорционален величине угла прихода оптического излучения.

Данная конструкция обладает высокой чувствительностью и позволяет автоматизировать процесс измерения угловых отклонений оптического излучения. Однако на результаты измерения

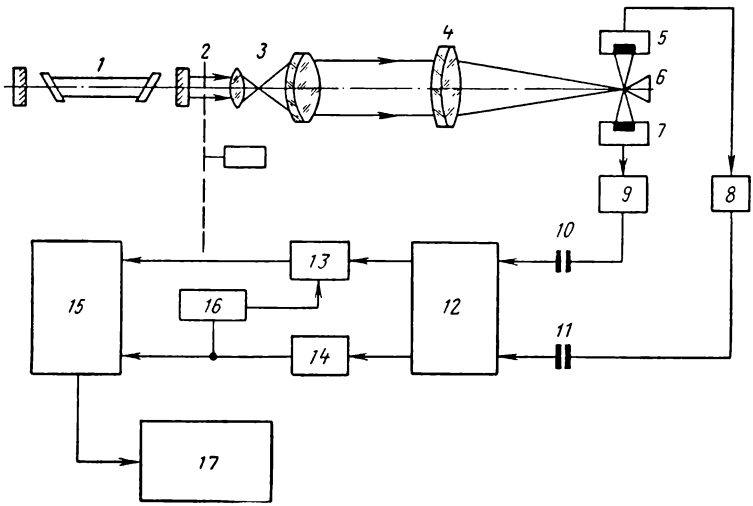


Рис. 151. Блок-схема автоматического прибора для измерения угловых флуктуаций оптического луча

существенное влияние оказывает фоновая засветка и в приборе к тому же использована сложная электронная аппаратура: зеркальный гальванометр, звуковой генератор, а частотные возможности конструкции ограничены выбором исполнительных органов.

В МИИГАиК предложены метод измерения, схема автоматического оптико-электронного прибора для исследования угловых смещений и угловых флуктуаций лазерного луча, используемого в качестве опорной визирной линии [67], [38], и создан макет.

Указанный прибор может быть использован также для изучения характера распространения в атмосфере не только лазерного излучения, но и излучения любого другого оптического источника света. Метод измерения основан на высокоточной регистрации при помощи фотоэлектрической системы угловых смещений кружка рассеяния от излучения лазера в фокальной плоскости объектива с записью результатов измерения самопишущим прибором.

Блок-схема автоматического оптико-электронного прибора для измерения угловых отклонений и угловых флуктуаций лазерного луча представлена на рис. 151.

Прибор представляет собой совокупность передающего устройства и приемной измерительной установки.

Передающее устройство содержит оптический квантовый генератор *1*, модулятор света *2*, коллимирующую оптическую систему *3*.

Приемная угломерная установка включает в себя объектив *4*, светоделительную призму *5*, установленную в задней фокальной плоскости объектива, два фотоприемника *6* и *7*, эмиттерные повторители *8* и *9*, переходные емкости *10* и *11*, устройство *12* для выделения мгновенной суммы и разности сигналов от фотоприемников, усилители разности *13* и суммы *14*, фазочувствительный выпрямитель *15*, выпрямитель *16* для регулировки коэффициента усиления усилителя *13*, регистрирующее устройство *17*.

При измерении угловых отклонений луча лазера *1*, его излучение модулируется в передающем устройстве модулятором *2* и коллиматором *3* направляется в объектив *4* угломерной установки. Измерение величины углового отклонения луча на входе угломерной установки осуществляется путем сравнивания по амплитуде двух световых потоков, поступающих после светоделительной призмы на фотоприемники *6* и *7*. Схема *12* выделяет мгновенные суммы и разности электрических сигналов от фотоприемников *6* и *7* и подает их на усилители разности *13* и суммы *14* сигналов. Фазочувствительный выпрямитель *15* осуществляет выделение сигнала, пропорционального величине и направлению углового отклонения оптического луча. Для устранения влияния изменения мощности излучения передающего устройства на точность измерения с выхода усилителя суммы *14* через выпрямитель *16* осуществляется управление коэффициентом усиления усилителя разности сигналов *13*. С выхода фазочувствительного выпрямителя *15* сигнал, пропорциональный величине и направлению углового отклонения оптического луча, поступает на регистрирующее устройство *17*.

При работе с прибором положение разделительной грани светоделительной призмы относительно фокальной плоскости объектива устанавливается с учетом ожидаемого диапазона угловых смещений оптического излучения с оптической оси прибора, чем достигается изменение диаметра кружка рассеяния в плоскости разделительного ребра светоделительной призмы.

Частота модуляции выбирается выше граничной частоты угловых флуктуаций оптического излучения в приземных слоях атмосферы (500 Гц) из-за турбулентности последней.

В качестве регистраторов для данного прибора могут быть использованы различные самопишущие приборы или шлейфовый осциллограф.

Вследствие незначительных по величине угловых смещений оптического луча в свободной атмосфере на расстояниях распространения луча до 100—200 м при работе с прибором грань светоделительной призмы можно расположить вблизи фокуса объектива

и для обеспечения высокой чувствительности прибора применять усилители с большим коэффициентом усиления. Тогда рабочий угловой диапазон прибора будет определяться диапазоном работы регистратора. При этом можно использовать наиболее линейный участок угловой характеристики.

Лабораторные исследования прибора показали, что в угловом диапазоне 13,5″ угловая характеристика прибора линейна и ошибка из-за нелинейности не превышает 1,0″. Экспериментально полученная угловая характеристика автоматического прибора показана на рис. 152.

При размещении светоделительной грани призмы точно в фокальной плоскости объектива угловой диапазон работы прибора составлял 6,0″, а ошибка из-за нелинейности угловой характеристики не превышала 0,14″.

Средняя квадратическая ошибка при многократном наведении на точку в этом диапазоне составила 0,07″.

Погрешность m_Σ в показаниях прибора возникает из-за нелинейности угловой характеристики, теплового дрейфа нуля прибора, ошибки снятия отсчета с диаграммной ленты регистратора.

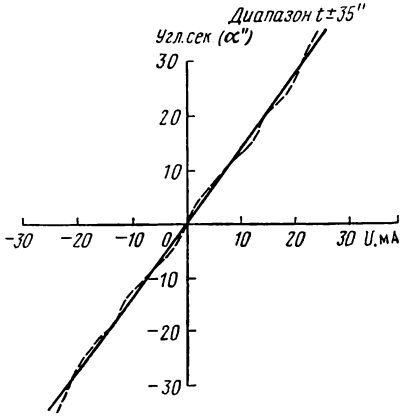


Рис. 152. Угловая характеристика автоматического прибора

Экспериментально были получены величины $m_\Sigma = 0{,}24''$ и $m_\Sigma = 1{,}02''$ для угловых диапазонов соответственно в 6 и 35″.

При полевых исследованиях прибора осуществлялась запись медленных угловых смещений и угловых флуктуаций излучения лазера в условиях сильно нагретой подстилающей поверхности на расстояниях 25, 50, 100 м при различной скорости движения ленты регистратора. Образец записи флуктуаций луча показан на рис. 153. Это дало возможность получить теневые графики и с использованием метода оптической обработки информации определить вероятностные законы распределения амплитуд угловых флуктуаций, энергетический частотный спектр флуктуаций и медленные угловые смещения лазерного луча во времени в зависимости от температурных градиентов и метеоусловий [67].

Для выявления медленных угловых смещений луча на диаграммных лентах отмечается время наблюдений через интересующие интервалы времени (10 мин, 1 ч и т. д.). По срединной части ленты проводят плавную кривую, характеризующую медленно протекающие во времени изменения углов прихода излучения. Через выбранные промежутки времени с плавной кривой диаграммной ленты снимают координаты интересующих точек

и в соответствии с масштабом записи определяют величины угловых смещений луча.

Организация наблюдений за поведением в атмосфере оптического луча при синхронной регистрации с помощью термогра-

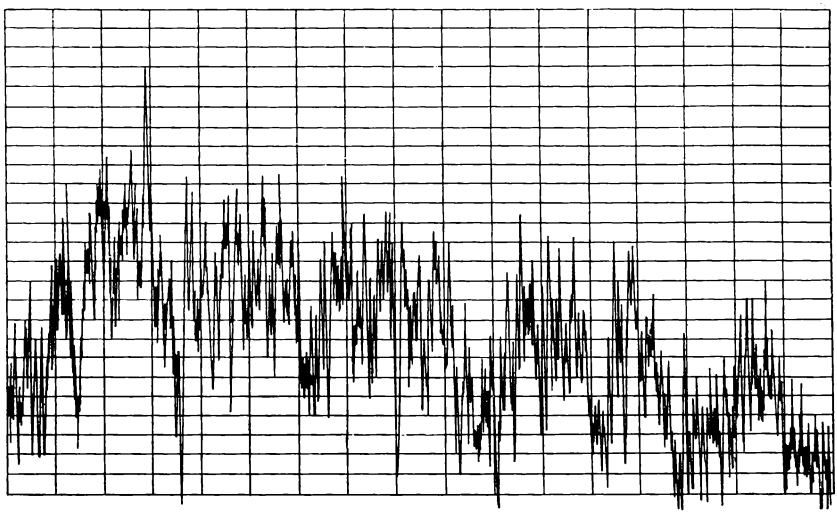


Рис. 153. Осциллограмма угловых смещений лазерного луча в атмосфере

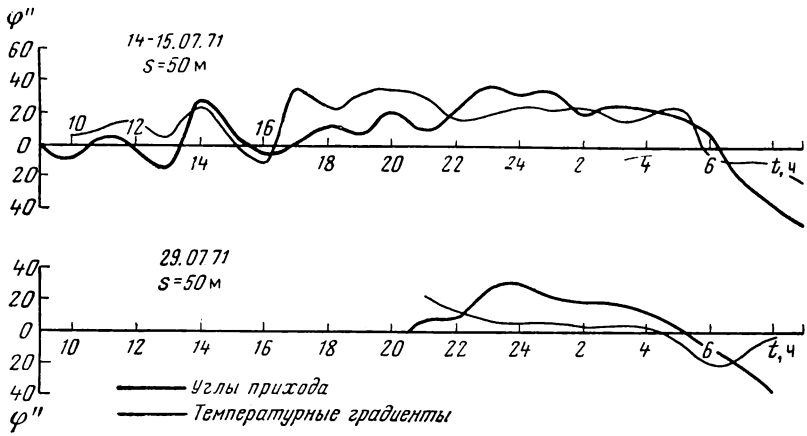


Рис. 154. Изменение углов прихода в атмосфере лазерного луча в зависимости от температурного градиента

диентомера температурных градиентов, присутствующих в атмосфере, позволяет установить корреляционную связь между величиной температурного градиента и углом прихода оптического луча.

На рис. 154 приведены графики медленных изменений углов прихода лазерного луча, распространяющегося над металлической направляющей в условиях открытой площадки, и показана взаимосвязь углов прихода с величиной температурного градиента при непрерывной регистрации процесса в течение целых суток.

Методику обработки результатов экспериментальных исследований по выявлению законов быстропротекающих во времени угловых флуктуаций рассмотрим ниже.

§ 42. МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ТОЧНОСТЬ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Изучение влияния внешних условий на точность геодезических измерений, как уже указывалось ранее, является достаточно сложной задачей. Использование современных оптико-электронных и радиофизических средств дает возможность собрать обширный статистический материал о характере неоднородностей атмосферы, выполнять геодезические измерения синхронно с фиксацией состояния метеоусловий, температурных градиентов, непосредственно измерять величины флуктуаций оптического луча и т. д. Однако по-прежнему одним из коренных вопросов, подлежащих решению, является вопрос, связанный с поиском путей решения, разработкой и созданием высокопроизводительных и недорогостоящих методов и аппаратуры для обработки собираемой информации.

Обработку экспериментальных данных можно проводить на ЭВМ, однако при этом запись результатов измерения необходимо вести в форме, удобной для ввода в ЭВМ, а в случае графической регистрации иметь сложные считывающие устройства. Эти обстоятельства затрудняют проведение быстрой первичной обработки данных, требуют разработки специальных программ для ЭВМ и дорогостоящего оборудования.

В последние годы значительно возрос интерес исследователей к оптическим методам обработки информации.

В силу большой информационной емкости оптических запоминающих устройств возможности параллельной обработки информации (без применения сканирования) и высокой скорости обработки оптические методы обработки информации выгодно отличаются от других известных методов [87].

В основе методов и устройств оптической обработки информации лежит использование волновых свойств света — интерференции и дифракции, а также знание законов и принципов оптической пространственной фильтрации.

Известно [87], что идеальная сферическая линза обладает свойством выполнять преобразования, аналогичные преобразованиям Фурье. Достоинством оптических систем является то, что в них преобразование Фурье реализуется с помощью простых элементов.

Исследованиями [87] установлено, что в когерентной идеальной оптической системе комплексное распределение амплитуды освещенности светового поля в передней фокальной плоскости линзы связано с комплексным распределением светового поля в задней фокальной плоскости линзы двумерным преобразованием Фурье. Поэтому сферическая линза может выполнять роль спектрального анализатора двумерных сигналов. Учитывая это свойство сферической линзы, можно, помещая в Фурье-плоскости линзы различные маски или транспаранты с заданным распределением

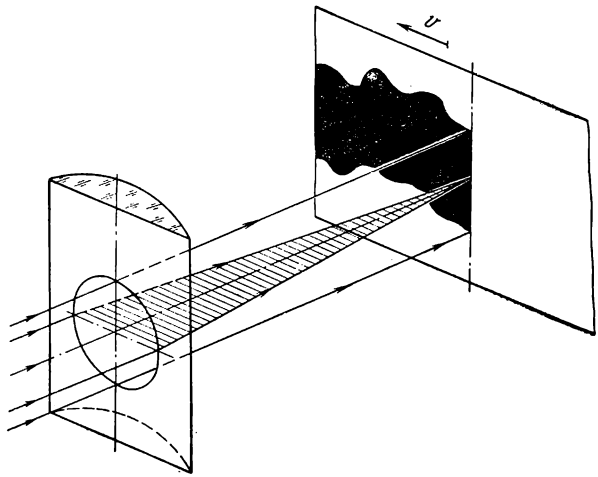


Рис. 155. Фотографический способ получения теневых графиков

прозрачности, осуществлять пространственную фильтрацию сигналов.

Для удобства последующей обработки запись исследуемых процессов можно вести в виде так называемых теневых графиков [31].

Под теневым графиком понимают транспарант, выполненный в виде прозрачной диаграммы на непрозрачном экране, причем форма края диаграммы описывается исследуемой функцией.

Такие транспаранты можно сразу получать при экспериментальных исследованиях. Например, при исследовании прохождения оптического излучения через атмосферу теневые графики, отражающие характер флуктуаций оптического луча могут быть получены на фотопластинке способом, представленным на рис. 155. Записи нерегулярных процессов, выполненные на диаграммных лентах самопишущих приборов, также могут быть преобразованы в теневые графики несложной доработкой.

Интересующие исследователей отрезки ленты закрашивают непрозрачной краской (рис. 156), а затем фотопутем получают контрастный негатив.

С помощью аналоговых оптических устройств с теневого графика можно получить большое число характеристик, в том числе энергетический частотный спектр исследуемого процесса, функцию распределения вероятностей амплитуд случайного сигнала и т. д.

Пусть $y = y(x) + \text{const}$ есть функция, описывающая форму края теневого графика.

При расположении такого графика в передней фокальной плоскости сферической линзы и освещении его нормально падающей

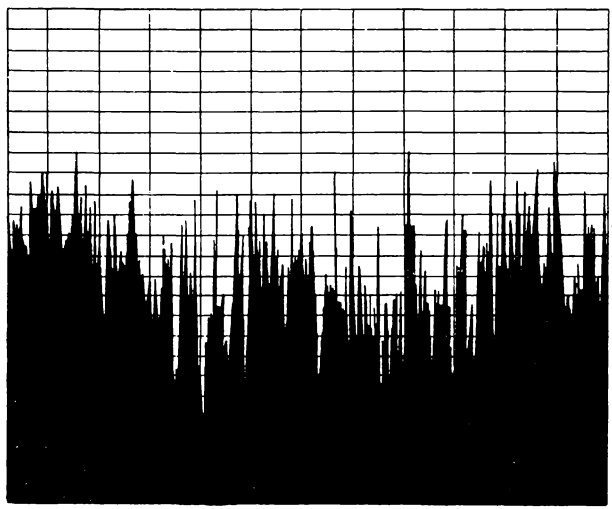


Рис. 156. Теневой график

плоской волной когерентного света поле $W(\xi, h)$ в задней фокальной плоскости линзы выражается через двумерное Фурье-преобразование поля в ее передней фокальной плоскости [31]

$$W(\xi, h) = C_1 \int_{-D}^{+D} dx \int_{0}^{\varphi(a)+\text{const}} \exp\left\{\frac{ik}{f}(x\xi + yh)\right\} dy, \qquad (159)$$

где D — полуширина апертуры линзы; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; C_1 = постоянная; f — фокусное расстояние линзы; ξ, h — координаты в задней фокальной плоскости линзы.

Интегрирование правой части этого выражения по y дает

$$W(\xi, h)\, dy = C_2 \int_{-D}^{+D} \frac{\sin\left[\frac{kh}{2f}(\text{const} + \varphi(k)\right]}{\frac{kh}{2f}} e^{-\frac{ikh}{2f}\varphi(x)} e^{\frac{ik}{f}x\xi} dx. \qquad (160)$$

Для $h = 0$ (что соответствует распределению поля на оптической оси линзы в ее задней фокальной плоскости вдоль оси) и с учетом того, что

$$\lim_{h \to 0} \frac{\sin \left\{ \frac{kh}{2f} [\varphi(k) + \text{const}] \right\}}{\frac{kh}{2f}} = 1, \tag{161}$$

получаем распределение поля в окрестности оси $h = 0$, пропорциональное спектру исследуемой функции $\varphi(x)$

$$W(\xi, 0) = C_2 \int_{-D}^{+D} [\varphi(x) + \text{const}] \exp \left\{ \frac{ik}{f} x\xi \right\} dx. \tag{162}$$

Пространственная частота $\nu = \frac{\xi}{\lambda f}$ функции $\varphi(x)$, получаемая на оптическом анализаторе спектра, связана с временными частотами $\nu_в$ соотношением

$$\nu_в = v\nu = \frac{\xi}{\lambda f} v, \tag{163}$$

где v — скорость записи процесса.

Полный двумерный спектр теневого графика, получаемый в задней фокальной плоскости линзы, оказывается достаточно сложным.

Однако в окрестности продольной оси изображение теневого графика соответствует одномерному преобразованию, а спектр — исследуемой функции $\varphi(x) + \text{const}$.

Обработку экспериментальных данных по теневым графикам на практике осуществляют следующим образом (для случая определения спектра исследуемого процесса):

собирают установку (рис. 157), состоящую из линзы, щели, подвижной диафрагмы, фотоприемника и усилителя с самопишущим прибором, и в переднюю фокальную плоскость линзы помещают теневой график;

теневой график освещают параллельным пучком когерентного света (от лазера) и щель в задней фокальной плоскости линзы устанавливают таким образом, чтобы выделить спектр вдоль пространственной оси;

диафрагму перемещают вместе с фотоприемником вдоль щели со скоростью, равной скорости записи теневого графика, и самопищущим прибором осуществляют запись энергетического частотного спектра исследуемого процесса;

проводят калибровку частот энергетического спектра. Для этого на место теневого графика устанавливают транспарант с известным энергетическим частотным спектром, например синусоиду с заданным периодом колебаний, и по измерительному прибору (самописцу), перемещая транспарант с прежней скоростью, осуществляют уточнение частотного масштаба.

Схема установки для определения функции распределения вероятностей амплитуд показана на рис. 158. Способ измерения основан на определении относительного времени пребывания реализации случайного процесса ниже заданного уровня. Это

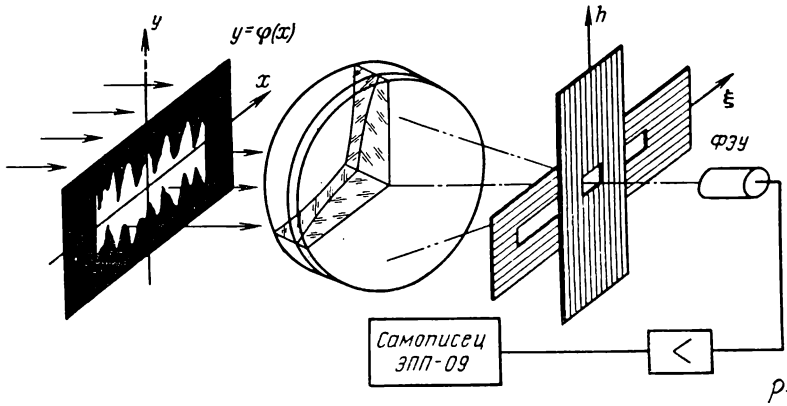


Рис. 157. Схема установки для получения спектра исследуемого процесса

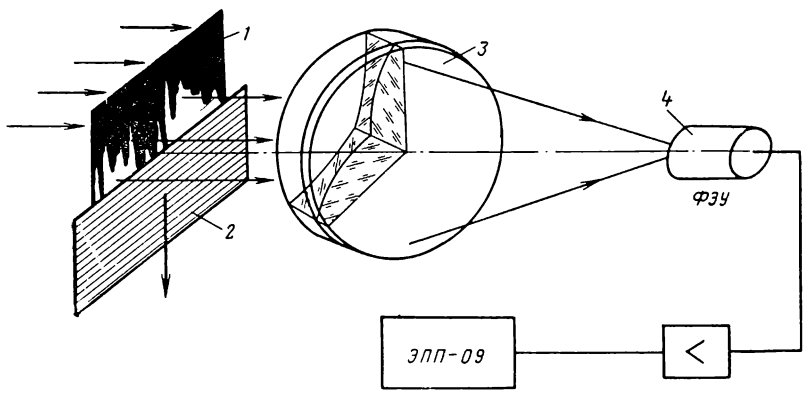


Рис. 158. Схема установки для определения функции распределения вероятностей амплитуд

условие выполняется при сканировании теневого графика прямолинейным краем непрозрачного ножа.

Теневой график *1* освещают параллельным пучком когерентного света и сканируют прямолинейным краем ножа *2*. Свет, проходящий через теневой график, собирается линзой *3* в ее фокальной плоскости на светочувствительную площадку фотоприемника *4*. Фототок фотоприемника пропорционален площади открытой прозрачной части теневого графика, т. е. вероятности превышения сигналом уровня анализа, задаваемого краем ножа. Калибровка

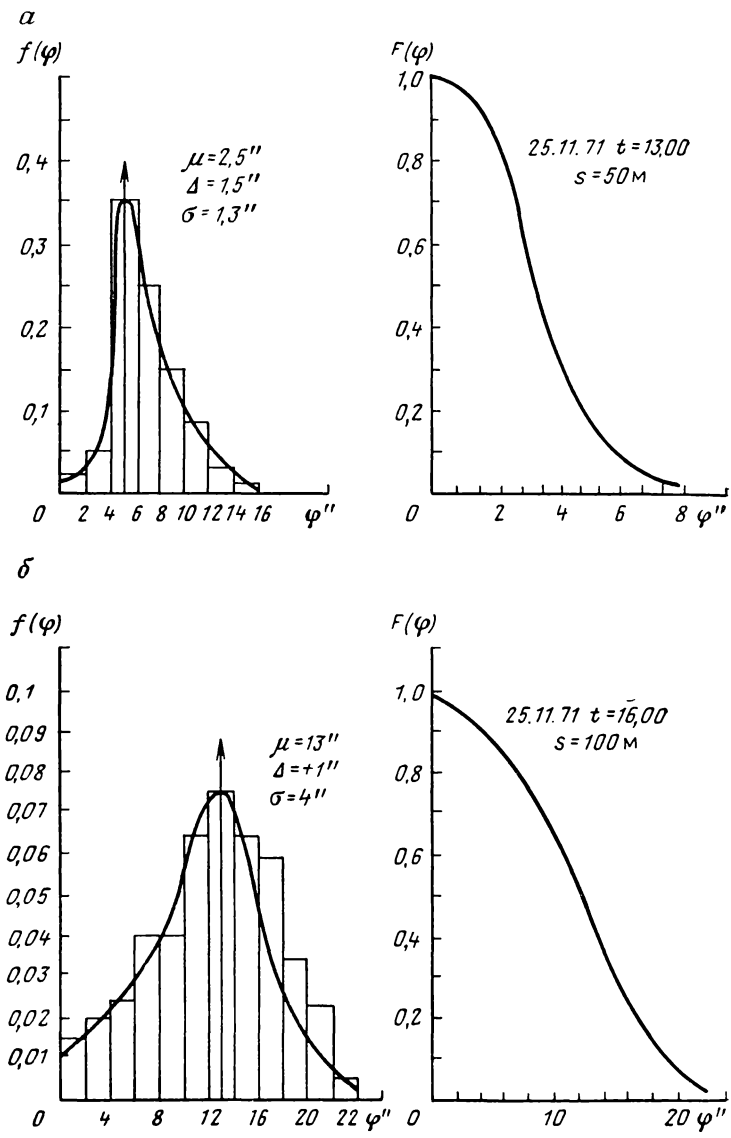


Рис. 159. Интегральный и дифференциальный законы вероятностей появления амплитуд

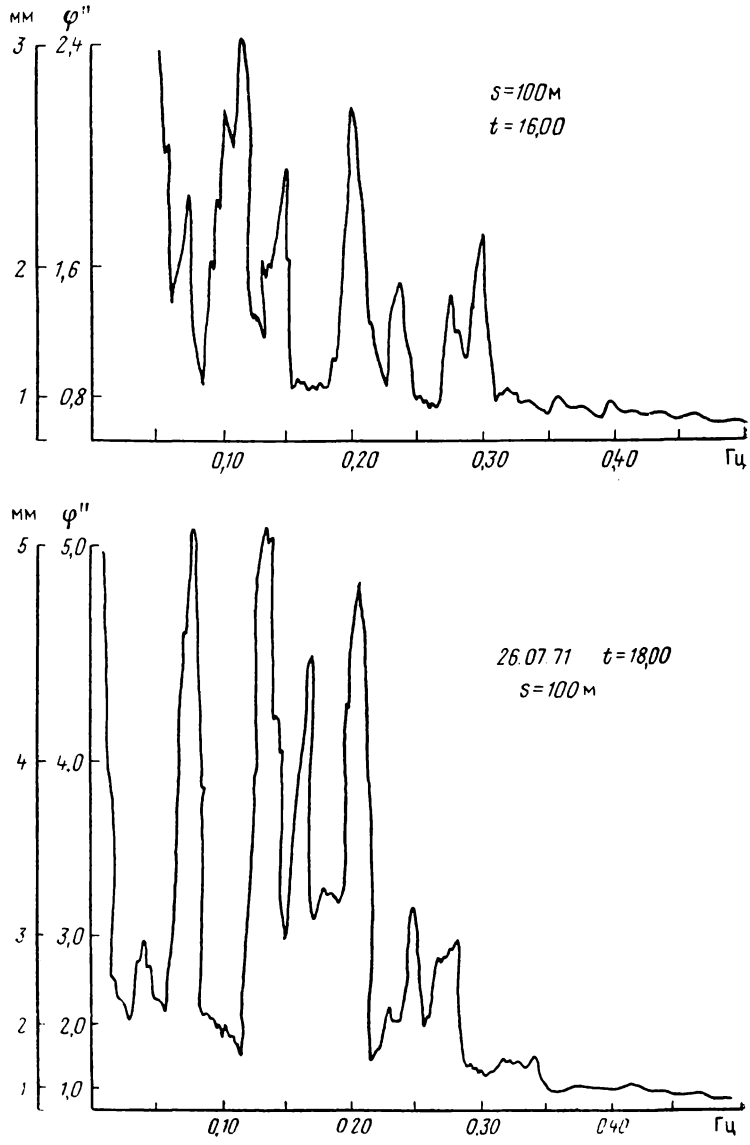


Рис. 160. Энергетический частотный спектр угловых флуктуаций

записи проводится по току фотоприемника при полностью открытом теневом графике.

Графические записи, получаемые на вышеописанной установке, отражают интегральный закон распределения вероятностей амплитуд случайного процесса.

Переход от интегрального закона к плотности распределения вероятностей амплитуд можно осуществить путем графического дифференцирования получаемых записей.

Оптический метод обработки информации, записанной в виде теневых графиков, был применен в МИИГАиК * при исследовании характера угловых флуктуаций лазерного излучения, распространяющегося над сильно нагретой подстилающей поверхностью.

Измерения, связанные с записью угловых флуктуаций лазерного излучения в атмосфере, проводились при помощи автоматического оптико-электронного прибора, описанного в § 41.

На диаграммных лентах выбирались наиболее характерные участки записи, которые затем закрашивались в теневые графики. Негативы с теневых графиков подвергали обработке по вышеизложенной методике. Это дало возможность получить кривые интегральной функции распределения вероятностей амплитуд быстрых флуктуаций углов прихода луча ОКГ и энергетические частотные спектры флуктуаций в различные временные отрезки и для различных расстояний между излучателем и приемником.

На рис. 159 для примера даны графики, отражающие интегральный (рис. 159, *а*) и дифференциальный (рис. 159, *б*) законы вероятностей появления амплитуд угловых флуктуаций, полученные способом оптической обработки информации для некоторой конкретной пятиминутной реализации и при расстоянии между излучателем и приемником 100 м.

По этим графикам можно достаточно просто установить математическое ожидание μ, стандарт σ и смещение Δ кривой плотности распределения вероятностей амплитуд угловых флуктуаций φ.

Энергетический частотный спектр угловых флуктуаций некоторой реализации, полученной способом оптической обработки информации, графически представлен на рис. 160.

Знание законов распределения амплитуд флуктуаций оптического луча, их энергетического частотного спектра позволяет правильно выбрать условия наблюдения при выполнении высокоточных геодезических измерений, грамотно сформулировать требования к вновь создаваемой автоматической геодезической аппаратуре, а также соответствующим образом вносить поправки в результаты геодезических наблюдений.

---

* Указанные исследования и обработка результатов были выполнены И. А. Науменко и А. А. Дяченко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов В. Г., Петренко А. И., Татаринов В. В. Устройство для измерения линейного перемещения объекта. Авторское свид. № 352121. Бюлл. изобретений № 28, 1972.

2. Автоматический рельсовый профилограф. Авторское свид № 192418. Бюлл. изобретений № 5, 1967. Авт.: А. М. Найдич, В. А. Алешин, М. М. Гостхман, Н. Н. Гусева, Т. А. Альмезова, А. И. Маркевич.

3. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. М., «Машгиз», 1959. 760 с.

4. Айзерман М. А. Лекции по теории автоматического регулирования. М., Госуд. изд-во физико-математической литературы. 1958, 520 с.

5. Артанов М. А. Нивелир-автомат. Теория и практическое применение. М., Трансжелдориздат. 1949. 46 с.

6. Барков Д. П. Применение муарового эффекта при высокоточных угловых измерениях. — «Труды Моск. ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии», 1970, вып. 57, с. 27—32.

7. Батраков А. С. Квантовые приборы. Л., «Энергия», 1972. 179 с.

8. Беляев Н. А. Маятниковый датчик. Авторское свид. № 256292. Бюлл. изобретений № 34, 1969.

9. Бирнбаум Д. Оптические квантовые генераторы (перевод с англ.). М., «Советское радио», 1967. 191 с.

10. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений с основами теории вероятностей. М., «Недра», 1965. 184 с.

11. Большая Советская Энциклопедия, том I. М., «Советская энциклопедия», 1970, с. 125—132.

12. Буюкян С. П. К возможности использования сканирующих устройств для створных измерений. — «Сборник науч. трудов. Т. 25. Сер. Строительство и архитектура». Ереван, 1971, ч. II, вып. 2, 89—95 с.

13. Бычков О. Д. Уровни и микронивелиры и их применение для геодезической выверки конструкций. М., «Недра», 1973. 112 с.

14. Васильев Д. В., Чунч В. Г. Системы автоматического управления. М., «Высшая школа», 1967. 418 с.

15. Васютинский И. Ю. Электроконтактный гидростатический уровень. Авторское свид. № 325489. Бюлл. изобретений № 3, 1972.

16. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Госуд. изд. физико-математической литературы. 1964. 576 с.

17. Войцеховский В. Использование лазеров в горной геодезии в свете новейших исследований. — «Прикладная геодезия», ПНР, 1971, т. 43, № 12.

18. Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светотехнических систем. М., «Искусство», 1959. 526 с.

19. Гидростатический нивелир. Авторское свид. № 318813. Бюлл. изобретений № 32, 1972. Авт.: Е. В. Тузов, Р. А. Мовсесян, И. А. Таплашвили, А. Н. Артанов.

20. Гиршберг М. А. Геодезия, ч. I, М., «Недра», 1967. 383 с.

21. Голубцов А. И., Комаров В. В. Высокоточный электронный центрировочный прибор. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1968, вып. 1, 123—129 с.

22. Голубцов А. И., Комаров В. В. Центрир. Авторское свид. № 238801. Бюлл. изобретений № 10, 1969.

23. Горбатов Н. М., Зильберман М. И. Основы автоматики. Л., Изд. Ленинградской лесотехнической академии. 1965. 185 с.

24. Гридин А. С., Ишанин Г. Г., Николаев В. Д. Прибор для управления землеройными машинами по заданному уклону. — «Изв. вузов. Приборостроение», 1966, т. IX, № 4, с. 36—47.

25. Гукайло М. Я. Автоколлимация. М. — К., Машгиз, 1963. 108 с.

26. Датчик углов наклона объектов. Авторское свид. № 321680. Бюлл. изобретений № 35, 1972. Авт.: В. Е. Андриевский, Ф. И. Бендич, Н. Т. Корзинкина, Л. А. Феофанов.

27. Дементьев А. Н., Коротков С. А., Федоров А. С. Способы формирования опорной геодезической плоскости с помощью лазера. — «Применение газовых лазеров в геодезии. Электроника СВЧ». Сер. I, 1972, вып. 1 (I), с. 36—40.

28. Дементьев В. Е., Федоров А. С., Шустов В. И. Исследование стабильности направления светового луча лазерных геодезических приборов ЛВ-2 и ЛВ-5. — «Применение газовых лазеров в геодезии. Электроника СВЧ». Сер. I, 1972, вып. 1 (I), с. 34—36.

29. Демушкин А. И. Фотоэлектрическая установка наведения и гидирования оптических инструментов на цель. Авторское свид. № 128150. Бюлл. № 9, 1960.

30. Дурейко Г. В., Усов В. С., Щербаков Я. Е. Отражатель двойного изображения для определения углов поворота. — «Измерительная техника», 1967, № 7, с. 80—81.

31. Дяченко А. А., Персиков М. В., Шушпанов О. Е. Спектральный анализ функций, записанных в виде теневых графиков. — «Оптика и спектроскопия», 1971, т. 33, вып. 3, с. 29—36.

32. Елизаренко А. С. Применение оптико-механических компенсаторов в оптико-электронных углоизмерительных приборах. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 2, с. 131—135.

33. Елисеев С. В. Фотоэлектрический и фотографический методы определения направления на цель применительно к геодезическим инструментам. — «Труды Центр. науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии», 1961, вып. 143, 72 с.

34. Живлюк Ю. Н. Некоторые свойства и применение плоскоконического аксикона. — «Исследования по физике и радиотехнике». Московский физико-технический ин-т. Оборонгиз, 1958, с. 12—21.

35. Зацаринный А. В. Исследование подвижной марки с дистанционным управлением в геодезических измерениях. — «Тезисы докладов XV научно-техн. конференции профессорско-преподавательского состава втузов закавказских республик». Ереван, 1969, с. 157—158.

36. Зацаринный А. В. О расчете параметров фотоэлектрических устройств для выверки прямолинейности направляющих при использовании ОКГ. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1968, вып. 6, с. 38—43.

37. Зацаринный А. В. Возможности применения фотоэлектрических преобразователей в число-импульсных интеграторах. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1971, вып. 4, с. 105—109.

38. Зацаринный А. В., Науменко И. А. К вопросу определения угловой нестабильности визирной линии, заданной оптическим излучением. Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях». Львов, 1974. с. 23—24.

39. Зацаринный А. В., Науменко И. А., Осипов В. К. Исследование автоматического метода контроля прямолинейности направляющих путей большой протяженности. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1972, вып. 1, с. 19—21.

40. Зацаринный А. В., Осипов В. К., Яковлев А. А. Автоматический метод контроля прямолинейности с использованием ОКГ и оптико-электронной измерительной системы. Применение оптико-электронных приборов в измерительной технике. Тезисы докладов. М., Московский дом науч.-техн. пропаганды, 1973, с. 147—149.

41. Згурский В. С., Лисицын Б. Л. Элементы индикации. М., «Энергия», 1974, 224 с.

42. Исайкин Е. А., Белевитин А. Г. Оптический отвес с самоустанавливающейся линией визирования. Авторское свид. № 261715. Бюлл. изобретений № 5, 1970.

43. Ищенко Е. Ф., Климков Ю. М. Оптические квантовые генераторы. М., «Советское радио», 1968. 470 с.

44. Катыс Г. П. Оптико-электронная обработка информации. М., «Машиностроение», 1973. 447 с.

45. Катыс Г. П., Стрельников Ю. В. Фотоэлектронное следящее устройство. Авторское свид. № 160777. Бюлл. изобретений № 5. 1964.

46. Клюшин Е. Б., Соловьев В. Н., Окунев Д. В. Устройство для определения смещения точек при центрировочных и створных измерениях. Авторское свид. № 226864. Бюлл. изобретений № 29, 1969.

47. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. Основы инфракрасной техники. М., «Машиностроение», 1967. 308 с.

48. Коптев А. А., Лебедев Н. Н., Ивандиков Я. М. Термический градиентомер ТГ-1. — «Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка», 1967, вып. 6. 139—145 с.

49. Коротков В. П., Карцев Е. А., Скачко Ю. В. Устройство для определения углов наклона. Авторское свид. № 300759. Бюлл. изобретений № 13, 1971.

50. Кравцов Н. В., Стрельников Ю. В. Позиционно-чувствительные датчики оптических следящих систем. М., «Наука», 1969. 117 с.

51. Кузнецов Г. И. Субъективные систематические ошибки определения уклонений точек от створа по методу подвижной марки. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1968, вып. 4, с. 48—50.

52. Лазеры для строительства. Проспекты фирмы Spectra — Physiks, 1974.

53. Лазерное устройство для установки прямолинейности и плоскости. — «Применение газовых лазеров в геодезии. Электроника СВЧ». Сер. I, 1972, вып. 1 (I), с. 63—66: Авт.: С. А. Алякишев, Д. В. Гордеев, М. И. Катаев, В. А. Медведев, Е. П. Остапченко.

54. Лебедев Н. Н. Курс инженерной геодезии. М., «Недра», 1974. 360 с.

55. Лебедев Н. Н., Мещеряков А. В. Оптический центрировочный прибор высокой точности. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1967, вып. 6, с. 34—40.

56. Левин Б. М. Оптическая струна ДП-477. Описание и руководство к пользованию. Л., ГОИ им. С. И. Вавилова, 1966. 15 с.

57. Левчук Г. П. О точности гидростатического прибора ЭНИМС. — «Труды Моск. ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии», 1962, вып. 50, с. 21—33.

58. Левчук Г. П., Гиршберг М. А. Высокоточная выверка направляющих путей автоматических линий большого протяжения. — «Труды Моск. ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки, картографии», 1960, вып. 38, с. 3—92.

59. Левчук Г. П., Зацаринный А. В. Принципы построения автоматических устройств для контроля прямолинейности направляющих путей большой протяженности. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 2, с. 35—42.

60. Левчук Г. П., Фролов Ю. Н. Исследование точности коллиматорного метода. — «Геодезия и картография», 1967, № 4, с. 14—16.

61. Манукян Ю. С., Джагаров Ю. А., Пирумов В. И. Устройство для определения углов наклона объектов. Авторское свид. № 309240. Бюлл. изобретений № 22, 1971.

62. Манфред Людвиг (ГДР). Фотоэлектрическое измерительное устройство. Авторское свид. № 365559. Бюлл. изобретений № 6, 1973.

63. Медянцева Л. Л., Любимцев М. Я., Горбачев В. В. Автоматический метод контроля прямолинейности поверхностей большой протяженности. — «Измерительная техника», 1967, № 4, с. 18—24.

64. Михелев Д. Ш. Определение угловых и линейных поправок за боковую рефракцию. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 2, с. 43—46.

65. Михелев Д. Ш. Формулы учета боковой рефрации при выполнении геодезических работ в закрытых помещениях. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1967, вып. 3, с. 67—75.

66. Миядзаки Кою. Никой кикой гаккай ронбунею. Япония, 1957, № 134.

67. Науменко И. А. Оптико-электронный метод исследования угловой нестабильности в атмосфере визирной линии, заданной оптическим излучением. — «Применение оптико-электронных приборов в измерительной технике». Тезисы докладов. М., Московский дом научно-технической пропаганды. 1973. 32—33 с.

68. Некоторые применения газовых лазеров. М., «Знание», 1970. 70 с. Авт.: В. П. Беляев, И. И. Девяткин, В. Ф. Мартынов, А. С. Федоров.

69. Нечипоренко П. К. Некоторые дополнения к нивелир-автомату проф. П. М. Леонтовского и автоматическое вычерчивание нивелирного профиля. — «Геодезист», М., 1926, № 13—14.

70. Новак В. Е., Буюкян С. П., Давидян Д. Б. К вопросу о гидростатическом нивелировании с дистанционным съемом информации о положении уровня жидкости. — «Сб. науч. трудов. Т. 25. Сер. Строительство и архитектура», часть II, вып. 2, 1971, с. 99—105.

71. Оглоблин Д. Н., Рейзенкинд И. Я. Новые маркшейдерские приборы. М., Госгортехиздат, 1961. 166 с.

72. Оптические приборы для измерения линейных и угловых величин в машиностроении. М., «Машиностроение». 1964. 254 с. Авт.: Ю. В. Коломийцев, М. И. Духопел, А. И. Инюшин, И. В. Артемьев.

73. Основы автоматического регулирования. Теория. Под ред. В. В. Солодовникова, М., Машгиз, 1954. 563 с.

74. Панков Э. Д. Система «ПУЛ» повышенной точности. — «Изв. вузов. Приборостроение», 1967, т. X, № 7, с. 62—69.

75. Патент США № 2713726 и 2713727.

76. Патент США № 2740028.

77. Патент Англии № 993715.

78. Патент США № 3253280.

79. Пахута С. (ПНР). О лазерных геодезических приборах, созданных в Польше. — Геодезия и картография. 1974, № 5, с. 54—64.

80. Погарев Г. В. О визирных осях зрительных труб. — Теория и расчет оптико-механических приборов (сб. статей ЛИТМО), 1949.

81. Поликер Б. Е., Козлов Ю. М. Датчик углов наклона объектов. Авторское свид. № 298818. Бюлл. изобретений № 11, 1971.

82. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. М., «Недра», 1972. 168 с.

83. Применение луча лазера в маркшейдерском деле. — «Горный журнал», 1968, № 9, с. 53—66. Авт.: В. Г. Афанасьев, Б. И. Гойдышев, В. Ф. Мартынов, А. С. Федоров.

84. Ратмиров В. А., Ивоботенко Б. А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. М. — Л., Госэнергоиздат. 1962. 127 с.

85. Светопроекционный отвес. Авторское свид. № 295022. Бюлл. изобретений № 2, 1971. Авт.: Ю. И. Рябов, Н. Я. Крупп, Г. Х. Бесчастный, А. А. Грунин.

86. Световой двухсторонний отвес. Авторское свид. № 329383. Бюлл. изобретений № 7, 1972. Авт.: Г. К. Рязанцев, И. С. Дуб, Х. К. Ямбаев, А. М. Назаров.

87. Свет В. Д. Оптические методы обработки сигналов. М., «Энергия», 1971. 104 с.

88. Серебряков Г. В., Корнилов В. П. Дифференциальный соленоидный датчик угла наклона. Авторское свид. № 200786. Бюлл. изобретений № 17, 1967.

89. Скобелев В. М., Афанасьев Е. И. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. М., «Энергия», 1973. 368 с.

90. Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. М., Изд-во иностр. лит., 1959. 448 с.

91. Вычислительные машины непрерывного действия. М., «Высшая школа», 1964. 464 с.

92. Соловейчик Я. С. Поверка прямолинейных длинных направляющих. — В сб.: Труды ЭНИМС, 1949, т. III, с. 28—68. (Экспериментальный научный институт металлорежущих станков.)

93. Стабилизатор вертикального направления визирной линии оптического отвеса. Авторское свид. № 342051. Бюлл. изобретений № 19, 1972. Авт.: А. С. Федоров, Н. Я. Крупп, В. И. Шустов, Ю. И. Рябов, М. В. Раик.

94. Стародубов Ю. Н. Геодезический автомат-нивелир на сельсинах. Авторское свид. № 139084. Бюлл. изобретений № 12, 1961.

95. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., «Энергия», 1962. 616 с.

96. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., «Наука», 1967. 548 с.

97. Телешевский В. И. Фотоэлектрический интерферометр. Авторское свид. № 281829. Бюлл. изобретений № 11, 1969.

98. Торочков В. Ю., Суражский Д. Я. Ветроизмерительные приборы. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 104 с.

99. Тузов Е. В., Мовсесян Р. А., Таплашвили И. А. Гидростатический нивелир. Авторское свид. № 342052. Бюлл. изобретений № 19, 1972.

100. Туркулец В. И., Удалов Н. П. Фотодиоды и фототриоды. М. — Л., Госэнергоиздат, 1962. 64 с.

101. Ульянцев С. А. Фотоэлектрический индикатор линейных перемещений. Авторское свид. № 377832. Бюлл. изобретений № 18, 1973.

102. Усов В. С. Об ошибке перефокусировки при контроле прямолинейности методом автоколлимации сходящихся пучков лучей. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1965, вып. 4, с. 133—135.

103. Усов В. С. О применении зеркальных систем для линейных измерений методом автоколлимации. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1964, вып. 4, с. 117—124.

104. Усов В. С., Черникова Н. В. Фокусирующие системы зрительных труб с неизменяющейся линией визирования. — «Труды Новосибирского ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии», 1971, т. XXV, с. 100—105.

105. Устройство для регистрации положения оси светового пучка. — «Геодезия и картография». 1974, № 1, с. 23—29. Авт.: Р. А. Мовсесян, А. А. Мартиросян, Ю. М. Абрамян, Е. В. Тузов, Е. А. Хесед, Ю. П. Артемов.

106. Уточкин Б. А. Электронный уровень. Авторское свид. № 194335. Бюлл. изобретений № 8, 1967.

107. Уточкин Б. А., Комаров В. В. Электронный уровень с жидкостной ампулой. — «Измерительная техника», 1967, № 2, с. 13—15.

108. Фельдман А. С. Датчик линейного перемещения объекта. Авторское свид. № 364838. Бюлл. изобретений № 5, 1973.

109. Федоров А. С. Применение лазерной следящей системы для инженерно-геодезических работ в строительстве. — «Применение газовых лазеров в геодезии. Электроника СВЧ». Сер. I, 1972, вып. 1 (I). 40—43 с.

110. Федоров А. С., Захаров О. С. Система визирования горнопроходческого щита с помощью лазера. — «Труды конференции по электронной технике». 1966, № 2, 21—17 с.

111. Фотоэлектронное устройство осциллографического типа. — «Сборник науч. трудов. Т. 25, Сер. Строительство и архитектура». Вып. 2, часть II, Ереван, 1971, с. 95—99. Авт.: С. П. Буюкян, Р. А. Мовсесян, Д. Б. Давидян, Х. К. Ямбаев.

112. Фотоэлектрическое устройство для измерения линейных и угловых перемещений. Авторское свид. № 381880. Бюлл. изобретений № 22, 1973. Авт.: Б. М. Левин, И. В. Шевцов, В. П. Братев, И. В. Зайцев.

113. Хесин А. Я. Импульсная техника. М., «Энергия», 1965. 167 с.

114. Цуккерман С. Т. Система дистанционного управления рабочим органом землеройных машин. Авторское свид. № 201936. Бюлл. изобретений № 18, 1967.

115. Цуккерман С. Т. Автоматизация управления машинами при помощи оптического луча. — «Изв. вузов. Приборостроение». 1966, т. 9, № 3.

116. Цуккерман С. Т., Великотный М. А. О возможности использования светодиодов в приборах управления лучом. — «Изв. вузов. Приборостроение». 1972, т. 15, № 12.

117. Цыкин Г. С. Усилители электрических сигналов. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961. 423 с.

118. Цыкина А. В. Проектирование транзисторных усилителей. М., «Связь», 1965. 160 с.

119. Шваб И. А., Шваб Н. А. Фотоэлектрический датчик угла. Авторское свид. № 353229. Бюлл. изобретений № 29, 1972.

120. Шиллингер В. И. Современное состояние и перспективы развития приборов для автоматического нивелирования местности. — «Труды Московского ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии», 1959, вып. 31, с. 49—55.

121. Щ у с т о в В. И. Лазерные приборы для целей инженерной геодезии в строительстве. — «Применение газовых лазеров в геодезии. Электроника СВЧ». Сер. I. 1972, вып. 1 (I), с. 26—32.

122. Щ е д р о в и ц к и й С. С. Авторское свид. № 221329. Бюлл. изобретений № 21, 1968.

123. Э р г л и с К. Э., С т е п а н е н к о И. П. Электронные усилители. М., Физматгиз, 1961. 487 с.

124. Я к у ш е н к о в Ю. Г. Оптические системы фотоэлектрических устройств. М., «Машиностроение», 1966. 160 с.

125. Я к у ш е н к о в Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М., «Советское радио», 1971. 336 с.

126. Я м б а е в Х. К. Результаты исследований лазерного створофиксатора. — «Проектирование, ЦНИИ информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике», 1970, вып. 2, с. 92—97.

127. Я н е н к о В. И. Выбор динамических характеристик чувствительного элемента нивелир-автомата рельсового пути. — «Сб. статей Всесоюз. науч.-исслед. ин-та горной геомеханики и маркшейдерского дела. ВНИМИ». 1965, № 58, с. 32—39.

128. A G A Geo — Plans 300. A new laser instrument providing a reference plane for levelling in all kinds of construction work. Проспект фирмы. Экспресс-информация. ОНТИ ЦНИИГАиК, вып. 9 (87), 1972, с. 1—4.

129. C h r z a n o w s k i A. J., A h m e d F. New Laser Aplications in Geodesy and Engineering Surveys. Kanada. 1971.

130. C h r z a n o w s k i A. J., J a n s s e n H. D. Use of Laser in Precision Levelling. — «Can. Surv.», 1972, 26, № 4, pp. 369—383.

131. D e u m l i c h F. Zur Entwicklung von Lasergeräten für geotatische Fluchtunssmessungen. —«Vermessungstechnik». Jg (1973), № 21, Heft 2.

132. H i l g e r W a t t s. Ltd. March. 1968 (Великобритания).

133. H o d a r a H. Proc. IEEE. 56. № 12, 2130 (1968).

134. H o l t z E. Vorrichtung zur Messung der Lagekoordinaten eines Punktes mittels eines horisontierten Laserstrahles, 1972, Патент ФРГ, кл. 42, с G/OI, № 1915935.

135. J o n e s L. Operations de nivellement avec equipement laser. Koninklijke academie voor overzeuse wetenschappen. Extrait du Bulletin des Sciences (1970—3 (Eruxelles).

136. T h e Johnson Ground Elevation Meter. The Australian Survejor, 1965, vol. 20, № 7, pp. 523—541.

137. M ü n c h K. Der Laser Theodolit Kern DKM — 2A. «Zeitschrift für Vermessundswesen», 1972, № 1, s. 10—15.

138. P h o t o — C e l l s measure better than human eye. Metalworking Production, 1960, m. 104, № 42, 33.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Введение 5

Глава I. Общие свойства элементов и автоматических измерительных систем геодезического назначения 7

§ 1. Основные понятия и определения 7
§ 2. Передаточная функция автоматической системы 11
§ 3. Типовые звенья автоматических систем 13
§ 4 Общее представление о структурных схемах автоматических систем и способы соединения типовых звеньев 16
§ 5. Частотные характеристики и устойчивость автоматических систем 19
§ 6. Основные требования к элементам автоматических систем геодезического назначения 23

Глава II. Датчики для высокоточного определения линейных и угловых смещений 27

§ 7. Общие положения 27
§ 8. Потенциометрические датчики 29
§ 9. Индуктивные датчики 32
§ 10. Емкостные датчики 35
§ 11. Фотоэлектрические датчики 39
§ 12. Диссекторные датчики для угловых измерений 69
§ 13. Датчики, основанные на муаровом эффекте 75
§ 14. Маятниковые датчики 77

Глава III. Источники оптического излучения, применяемые при автоматизации высокоточных инженерно-геодезических измерений 82

§ 15. Тепловые источники оптического излучения 82
§ 16. Оптические квантовые генераторы как источники оптического излучения в инженерно-геодезических измерениях 86

Глава IV. Способы формирования опорной линии и геодезической плоскости оптическим излучением 94

§ 17. Задание опорной линии сколлимированным лазерным лучом 94
§ 18. Формирование опорной линии зонными пластинами 98
§ 19. Способы формирования опорной линии тепловыми излучателями 101

Стр.

§ 20. Методы развертки лазерного луча в геодезическую плоскость ... 103

V. Автоматизация створных измерений ... 104

§ 21. Автоматические и полуавтоматические способы производства створных измерений ... 104

§ 22 Подвижная визирная марка с дистанционным управлением ... 106

§ 23. Методы дистанционной передачи отсчетов при створных измерениях с использованием подвижной марки ... 109

§ 24. Фотоэлектрические устройства для автоматизации створных измерений ... 115

Глава VI. Автоматизация высокоточного контроля прямолинейности направляющих конструкций большой протяженности и технологического оборудования ... 131

§ 25. Основные требования к методам и средствам контроля прямолинейности ... 131

§ 26. Методы контроля прямолинейности, основанные на использовании фотоэлектрических устройств ... 137

§ 27. Фотоэлектрические угломерные следящие системы в приборах контроля прямолинейности ... 146

§ 28. Число-импульсные интеграторы и регистрирующие устройства приборов контроля прямолинейности ... 158

§ 29. Принципы конструирования автоматических приборов для контроля прямолинейности, основанных на способе последовательного интегрирования ... 169

Глава VII. Применение лазерных приборов для автоматизации строительно-монтажных работ ... 172

§ 30. Области применения лазерных приборов в строительно-монтажных работах ... 172

§ 31. Лазерные визиры ... 173

§ 32. Лазерные нивелиры ... 180

§ 33. Лазерные приборы вертикального проектирования ... 189

§ 34. Лазерные теодолиты ... 196

Глава VIII. Автоматические приборы для установки оборудования в проектное положение и наблюдения за осадками и смещениями ... 200

§ 35. Высокоточный электронный центрировочный прибор 200

§ 36. Микронивелиры с электронной регистрацией ... 203

§ 37. Автоматические системы гидростатического нивелирования ... 207

§ 38. Измеритель линейных смещений с муаровым датчиком 215

Глава IX. Методы и аппаратура для исследования влияния внешних условий на точность инженерно-геодезических измерений ... 219

§ 39. Основные факторы внешних условий, определяющие пространственную нестабильность визирной линии ... 219

§ 40. Высокоточный термический градиентомер ... 223

§ 41. Автоматический оптико-электронный прибор для исследования угловых смещений и флуктуаций лазерного луча ... 226

§ 42. Методы оптической обработки информации при изучении влияния внешних условий на точность геодезических измерений ... 231

Список литературы ... 239

АНАТОЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ
ЗАЦАРИННЫЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Редактор издательства *Н. В. Протопопова*
Переплет художника *Е. Н. Борщаговской*
Художественный редактор *В. В. Евдокимов*
Технический редактор *В. В. Максимова*
Корректор *И. Н. Таранева*

Сдано в набор 11/IX 1975 г.
Подписано в печать 6/I 1976 г.
Т-00018. Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага № 1.
Печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 14,16.
Тираж 4900 экз. Заказ № 504/5310-15.
Цена 91 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 6
Союзполиграфпрома Государственного
комитета Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 91.