Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

И. А. АРБУЗОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Конспект лекций

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

ЛЕНИНГРАД
1975

УДК 621.317.39 : 556 (04 + 07)

Одобрено Ученым советом Ленинградского гидрометеорологического института

Книга представляет собой конспект читаемых в ЛГМИ лекций, содержащих необходимые сведения из информационной теории измерительных устройств, об основных измерительных преобразователях, используемых для преобразования различных гидрологических величин в электрические, о разновидностях методов построения электрических приборов для измерения неэлектрических величин и о существующих методах и устройствах для измерения основных гидрологических величин.

Книга предназначена для студентов-гидрологов гидрометеорологических институтов и государственных университетов.

© Ленинградский гидрометеорологический институт, 1975 г.

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

М-20561 Подп. к печ. 24.09.75 г. Объем $9^7/_8$ п. л. Тир. 1000
Типография ВВМУПП им. Лен. комсомола Зак. 26 Цена 72 коп.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем курсе рассматриваются физические основы и теория методов построения электрических приборов для измерения неэлектрических величин, которые встречаются при гидрологических измерениях и наблюдениях.

Систематические наблюдения за гидрологическим режимом водных объектов в целях изучения характеристик уровней, стока воды и наносов, химического состава вод, температуры воды, ледовых явлений, снежного покрова и многих других, а также различные научные исследования в лабораторных и натурных условиях связаны с измерением многочисленных физических величин.

Развитие измерительной техники за последнее десятилетие убедительно показало, что наиболее удобным является представление результата измерения в виде электрической величины. Тогда для всех последующих операций (усиление, передача на расстояние, регистрация, математическая обработка) может быть использована электрическая аппаратура, обладающая рядом существенных преимуществ.

1. Возможность усиления электрических сигналов в десятки и сотни тысяч раз, а следовательно, в это же число раз увеличивать чувствительность измерительной аппаратуры. Благодаря этому удается регистрировать такие величины, которые другими методами обнаружить не удается.

2. Малая инерционность (высокое быстродействие) электрической аппаратуры, что дает возможность измерять быстро изменяющиеся во времени величины.

3. Возможность передачи электрических сигналов на расстояние, и следовательно, измерение на расстоянии, измерение в местах, недоступных для наблюдателя.

4. Представление измеряемых величин в виде унифицированных электрических сигналов позволяет вести одновременное измерение и регистрацию большого количества различных по своей природе физических величин.

5. Результат измерения может быть представлен в виде, удобном для машинной обработки на аналоговых и цифровых вычислительных машинах.

6. Возможность комплектования измерительных устройств из унифицированных блоков типовой электрической аппаратуры.

Глава I

ЭЛЕМЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

§ 1.1. Сущность измерения

В настоящее время в теории измерительных устройств обобщающей наукой становится кибернетика и ее теоретические основы в виде теории информации. Информацией называются любые сведения, представляемые в форме устной речи, письма, изображения, чисел измеряемых величин, команд и сигналов.

Под измерением во всех случаях практики понимается процесс получения человеком или машиной информации о количественном значении измеряемой величины. Получение любой информации, в том числе и измерительной, теория информации трактует как устранение некоторой части неопределенности, а количество информации определяется как разность неопределенностей ситуаций до и после получения данного сообщения.

§ 1.2. Последовательный натуральный ряд

Познание, приобретенное человеком в результате повторяющихся практических наблюдений, убеждает нас в том, что различные предметы могут сравниваться между собой лишь по однородным свойствам (весу, размеру, твердости, температуре и т. д.). При этом под однородными свойствами и характеризующими их величинами мы понимаем лишь такие, которые могут быть сопоставлены между собой по признаку «больше—меньше».

Ряды, составленные по однородным свойствам различных предметов, называются последовательными натуральными рядами, причем в этом ряду каждая из входящих в него величин больше всех предыдущих и меньше всех последующих.

§ 1.3. Шкала реперов измеряемой величины

После того как возможные значения измеряемой величины расставлены по признаку больше—меньше в последовательный натуральный ряд, последующей предпосылкой для возможности производства измерений является выбор некоторых из этих значений в качестве отправных (реперных) точек. Совокупность выбранных реперных точек образует шкалу возможных значений измеряемой величины — шкалу физической величины. Например, современная международная шкала температуры основывается на шести реперных точках, которым приписаны следующие значения температур: точка кипения кислорода — 182,97° С, точка плавления льда — 0,000° С, точка кипения воды — 100,000° С, точка кипения серы — 444,60° С, точка плавления серебра — 960,5° С и точка плавления золота — 1063,0° С. Шкала скорости ветра Бофорта, существовавшая до 1964 г., имела пределы от 0 (штиль) до 12 баллов (ураган). По сей день существуют минералогическая шкала твердости от 0 (мягче талька) до 10 баллов (твердость алмаза и выше), шкала чувствительности фотопленок и т. д.

§ 1.4. Измерение по натуральным шкалам

В случае измерения по натуральным шкалам весь диапазон возможных значений измеряемой величины разбивается реперными точками на ряд интервалов. Неопределенность до измерения характеризуется тем, что мы не знаем, в каком из этих интервалов лежит значение измеряемой величины. Результатом измерения является указание того, что измеряемая величина лежит в данном интервале, т. е. сужение области неопределенности от полной длины натуральной шкалы до длины указанного интервала. Таким образом, с точки зрения теории информации результат измерения заключается в выборе данного интервала из целого ряда возможных интервалов.

В самом общем случае измерение представляет собой сравнение измеряемой величины с тем или иным образом назначенной шкалой возможных значений этой величины, а результат измерения состоит в выборе одного интервала из всего множества интервалов этой шкалы.

При этом основная особенность результата измерения состоит в том, что он никогда не может представлять собой точного значения измеряемой величины, а является лишь указанием более или менее узкого интервала возможных значений.

Основным недостатком натуральных шкал является полное отсутствие уверенности в том, что интервалы между выбранными реперными точками хотя бы в какой-то мере являются равновеликими, т. е. отсутствие пропорционального деления.

§ 1.5. Функциональная шкала

Поскольку для целого ряда величин (мощность, энергия и др.) единица измерения вообще не может быть вещественно воспроизведена и использована при измерении, то единственным методом интерполяции натуральной шкалы измеряемых величин между реперными точками может служить метод измерительных преобразований, представляющий собой определение измеряемой величины по значению другой величины, функционально с ней связанной.

Понятие об измерительном преобразовании является фундаментальным понятием современной теории измерительных устройств и с физической точки зрения означает, что измеряемая величина не может быть определена сама по себе, а может быть воспроизведена только вместе с физическим процессом, в котором она проявляется. Это дает возможность натуральную шкалу реперных точек заменить функциональной шкалой, построенной на основе выбранного измерительного преобразования. Так, например, при построении функциональной температурной шкалы исторически впервые было принято измерительное преобразование в форме видимого объемного расширения ртути в стеклянной оболочке, наблюдаемое по перемещению конца ртутного столбика в капилляре термометра. При этом диапазон температур между реперными точками (точка плавления льда и точка кипения воды) может быть разбит на пропорциональные интервалы. Однако более глубокое изучение «ртутной шкалы» температуры указало на ее нелинейность (непропорциональность). В настоящее время для определения температурной шкалы между реперными точками 0 и 100° С используют платиновые термометры сопротивления, причем и в этом случае приходится «платиновую» температуру пересчитывать в действительную по трехчленной формуле Каллендера.

§ 1.6. Единица измерения

После того как выбран определенный метод измерительного преобразования, обеспечивающий достаточно линейную зависимость между измеряемой величиной и величиной, используемой для ее отсчета, может быть введено понятие единицы измерения интересующей нас величины. Действительно, если на основе данного измерительного преобразования может быть построена функциональная шкала измеряемой величины, все интервалы которой с достаточной степенью точности равны между собой, то каждый из этих интервалов или некоторое их число могут быть приняты в качестве единицы измерения измеряемой величины.

Если за единицу измерения величины x принято ее значение, равное x_e, то любое произвольное значение x этой величины можно выразить как

$$x = nx_e. \tag{1.1}$$

Таким образом, результат измерения n есть

$$n = \frac{x}{x_e}. \tag{1.2}$$

Отсюда классическое определение измерения: «Измерением называется процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу».

Исходя из этого, уравнение (1.1) часто называют основным уравнением измерения. Как видно отсюда, классическое определение сужает понятие измерения, связывая его лишь со шкалой, построенной на основе единицы измерения.

§ 1.7. Определения измерения и измерительного устройства

В действительности понятие измерения значительно шире. Так Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко еще на заре развития теории измерительных устройств писали: «Техническое измерение есть преобразование измеряемой величины в целях ее удобной оценки, сигнализации, документации, математической обработки, передачи на расстояние и автоматического регулирования».

Следовательно, процесс измерения, выполняемый любым измерительным устройством (включая необходимые действия человека—оператора), состоит из ряда последовательных частных преобразований измеряемой величины, проводимых до тех пор, пока она не будет представлена в том виде, ради получения которого и выполняется данное измерение.

Эти отдельные частные преобразования измеряемой величины реально осуществляются отдельными элементарными узлами измерительного устройства — измерительными преобразователями.

В этой связи измерительное устройство определяется как цепь измерительных преобразователей, образующих канал преобразования информации о значении измеряемой величины в результат измерения, наиболее удобный для дальнейшего использования человеком и машиной.

§ 1.8. Функция преобразования измерительного устройства

Функцией преобразования любого измерительного прибора или отдельного измерительного преобразователя является зависимость его выходной величины α от входной (измеряемой или преобразуемой) величины x, т. е. функция вида

$$\alpha = f(x). \tag{1.3}$$

В обычных описаниях измерительных преобразователей и состоящих из них измерительных устройств связь между преобразуемой (входной) и преобразованной (выходной) величинами предполагается однозначной. В действительности же, вследствие погрешностей прибора или преобразователя, эта функция не может быть представлена строго детерминированной однозначной зависимостью. Например, если на вход преобразователя подано строго определенное значение входной величины x_i, то выходная величина α_i может принять любое значение в некоторой полосе около номинальной характеристики преобразователя (рис. 1.1).

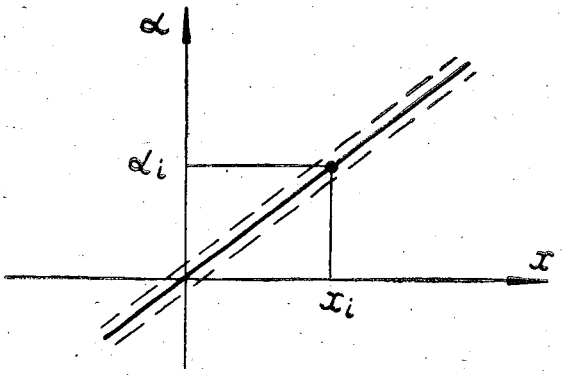


Рис. 1.1. Полоса неоднозначности функции преобразования измерительного устройства.

Очевидно, что величина α_i является лишь математическим ожиданием ряда фактических реализаций процесса измерения, причем каждое измерение характеризуется случайной погрешностью измерения со своим законом распределения $p(x)$.

§ 1.9. Интервал неопределенности

В случае распределения погрешности, близкого к равномерному(рис. 1.2,*а*), при многократном повторении измерений величины x_i, погрешностей больших, чем $+\Delta_0$ и меньших, чем $-\Delta_0$, практически не встречается, а внутри этого интервала все значения погрешностей примерно равновероятны. Величину интервала неопределенности нетрудно найти непосредственно, так как он просто равен $2\Delta_0$, и указание максимальной величины погрешности $\pm\Delta_0$ полностью характеризует возможные погрешности прибора.

При более сложных законах распределения (рис. 1.2,*б* и *в*) указать интервал неопределенности можно только на основе теории информации.

Величина этого интервала может не зависеть от текущих значений входной величины x (рис. 1.3,*а*) (аддитивная составляющая погрешности) и может быть пропорциональной текущим значениям входной величины x (рис. 1.3,*б*) (мультипликативная составляющая погрешности).

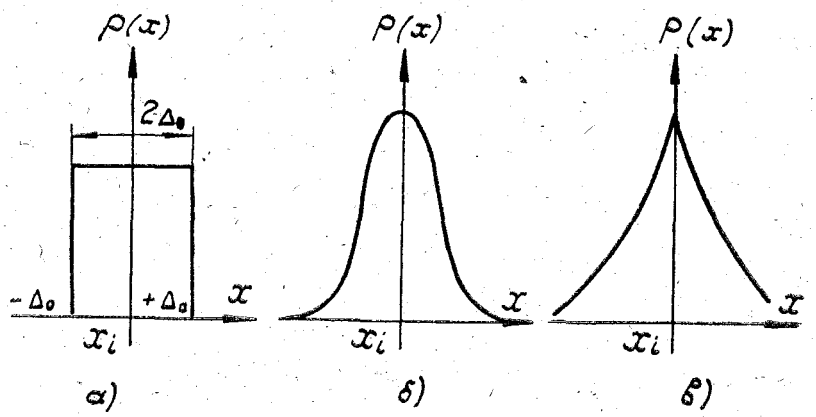


Рис. 1.2. Законы распределения случайных погрешностей измерительных устройств:
а — равномерный; *б* — нормальный (Гаусса); *в* — Лапласа.

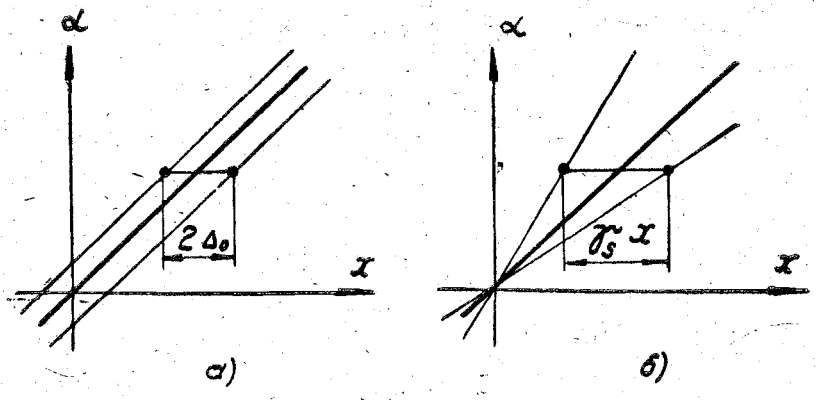


Рис. 1.3. Аддитивная (*а*) и мультипликативная (*б*) составляющие погрешности измерительного устройства.

В общем случае имеют место обе составляющие погрешности. Первая составляющая в измерительной технике получила название погрешности нуля прибора или преобразователя. Вторая со-

ставляющая проявляется в изменении наклона характеристики преобразователя и называется погрешностью чувствительности.

Если прибор или отдельный преобразователь имеет абсолютную погрешность нуля, равную Δ_0, и относительную погрешность чувствительности, равную γ_s, то суммарная погрешность Δ в функции текущего значения x входной величины выражается уравнением

$$\Delta = \Delta_0 + \gamma_s x. \qquad (1.4)$$

§ 1.10. Разрешающая способность прибора. Квантование по уровню

Для совокупной оценки точности и длины диапазона прибора или преобразователя вводится понятие разрешающей способности, определяемое как число достоверно различаемых градаций результата измерений во всем диапазоне прибора или как число квантов уровней измеряемой величины, вписывающихся в полосу неопределенности результата измерения по всей длине рабочего диапазона прибора (рис. 1.4).

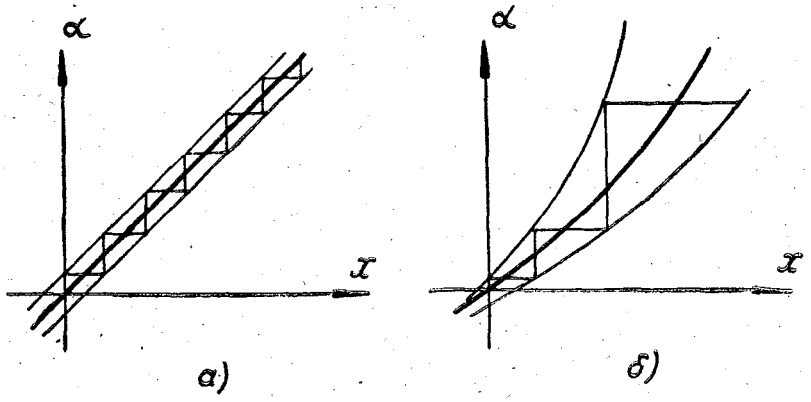


Рис. 1.4. Равномерное (*а*) и неравномерное (*б*) квантования по уровню.

Таким образом, любая непрерывная измеряемая величина из-за наличия полосы неопределенности может иметь лишь ограниченное число значений в заданном диапазоне измерения, каждое из которых отличается друг от друга на некоторую величину, называемую **квантом**. Если интервалы между отдельными значениями измеряемой величины одинаковы, то такая дискретная величина называется **квантованной величиной**, а сам процесс преобразования непрерывной величины в дискретную — **квантованием по уровню**. При этом диапазон изменения величины x

условно делится на N уровней квантования, каждый квант из которых равен

$$\Delta x = \frac{x_m - \Delta_0}{N}. \tag{1.5}$$

Истинное значение непрерывной величины округляется до ближайшего уровня квантования, т. е. всем значениям непрерывной величины, лежащей в интервале от $A - \frac{\Delta x}{2}$ до $A + \frac{\Delta x}{2}$ приписывается одно и то же число A.

§ 1.11. Квантование во времени

Если измеряемая величина изменяется во времени, т. е. является функцией $x(t)$, то квантование по уровню приводит к квантованию во времени. Действительно, вследствие погрешностей и помех достоверными являются только значения, разделенные промежутками Δx, и непрерывная кривая может быть заменена рядом точек, полученных в пересечениях данной кривой с горизонтальными линиями уровней квантования (рис. 1.5).

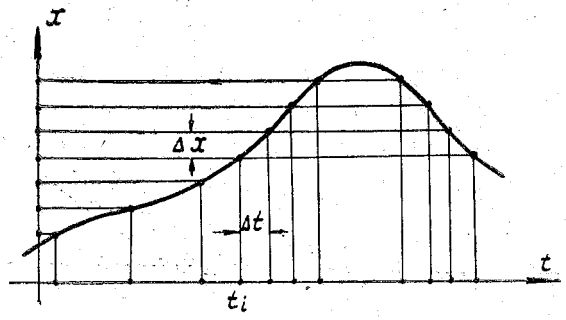


Рис. 1.5. Связь между квантованием во времени с квантованием по уровню.

Проектируя эти точки на ось времени t, получаем промежутки Δt, через которые целесообразно производить отсчеты. Таким образом, дискретность по оси времени t полностью определяется дискретностью квантования по оси x и крутизной функции $x(t)$ на ее отдельных участках. Из рис. 1.5 для любого момента времени t_i можно найти

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\left.\frac{dx}{dt}\right|_{t=t_i}}. \tag{1.6}$$

При $\frac{dx}{dt} \to 0$ $\Delta t \to \infty$; при $\frac{dx}{dt} \to \infty$ $\Delta t \to 0$.

§ 1.12. Частотный критерий отсчетов во времени

Рассмотрим этот вопрос под другим углом зрения. Известно, что любая периодическая функция $x(t)$ может быть разложена в ряд Фурье, т. е. представлена совокупностью элементарных синусоидальных функций (гармоник)

$$x(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty}\left(a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T_1} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T_1}\right), \qquad (1.7)$$

где C_0 — постоянная составляющая; a_k — косинусный коэффициент; b_k — синусный коэффициент; k — номер гармоники; T_1 — период первой гармоники.

В большинстве случаев количество гармоник не равно бесконечности. Кроме того, многими высшими гармониками, имеющими чрезвычайно малые амплитуды, можно пренебречь. В результате этого ряд Фурье ограничивается некоторой наивысшей гармоникой, частота которой

$$f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}. \qquad (1.8)$$

Число n гармоник получается от деления наивысшей частоты $f_{\max}$ на частоту f_1 первой гармоники

$$n = \frac{f_{\max}}{f_1} = \frac{T_1}{T_{\min}} = f_{\max} \cdot T_1. \qquad (1.9)$$

Так как функция $x(t)$ в интервале T_1 полностью определяется n слагаемыми вида

$$a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T_1} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T_1}, \qquad (1.10)$$

а каждое слагаемое представляет собой синусоидальное колебание определенной частоты и амплитуды, поэтому для аналитического определения функции $x(t)$ необходимо решить $2n$ уравнений с $2n$ неизвестными.

Разделим интервал T_1 на $2n$ равных частей Δt,

$$\Delta t = \frac{T_1}{2n}, \qquad (1.11)$$

и найдем промежутки времени Δt, имея в виду, что $n = f_{\max} \cdot T_1$,

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}}. \qquad (1.12)$$

Таким образом, получается частотный критерий отсчетов во времени, вытекающий из двух теорем В. А. Котельникова. Этот критерий можно сформулировать следующим образом: «Функция $x(t)$ с ограниченным частотным спектром полностью определяется совокупностью мгновенных отсчетов, следующих один за другим через промежутки времени Δt, обратно пропорциональные удвоенной наивысшей частоте f_{max}».

§ 1.13. Критерии отсчетов в пространстве

В тех случаях, когда объекты характеризуются пространственным распределением какого-либо параметра x (поле скоростей течений, распределение глубин по ширине реки, водоема и т. д.), необходимо руководствоваться критериями отсчетов в пространстве.

Одномерная система с обобщенной пространственной координатой l и параметром x описывается функцией $x(l)$ в принципе не отличающейся от функции $x(t)$.

В этом случае можно пользоваться понятием пространственной частоты

$$f_l = \frac{1}{L}, \tag{1.13}$$

причем период L выражается в единицах длины.

Поэтому для отсчетов значений параметра x в отдельных точках пространства можно применить критерии, установленные выше:

$$\Delta l = \frac{\Delta x}{\left.\frac{dx}{dl}\right|_{l=l_i}}; \tag{1.14}$$

$$\Delta l = \frac{1}{2fl_{max}}. \tag{1.15}$$

Все эти критерии можно распространить на двух- и трехмерные системы. Примеры использования рассмотренных критериев в гидрометеорологии можно найти в работе [3].

§ 1.14. Связь между передачей информации и обменом энергии

В течение 1951—1956 гг. видный американский физик Леон Бриллюэн опубликовал ряд работ, в которых он обстоятельно исследовал взаимосвязь энергии и количества передаваемой ею информации. Основной вывод Бриллюэна состоял в том, что информация может быть получена лишь в результате затрат энергии Передача информации от объекта измерения к измерительному ус-

тройству может происходить только путем энергетического взаимодействия. При отсутствии обмена энергии передача информации и, следовательно, измерение невозможны.

§ 1.15. Энергетический порог чувствительности

Пытаясь все точнее определить значение измеряемой величины, мы всегда сталкиваемся на каком-то этапе с принципиальной невозможностью его дальнейшего уточнения. Ярче всего это проявляется при измерении дискретных величин (измерение с погрешностью до дробной величины просто невозможно). В силу дискретности как вещества, так и энергии любое физическое явление, которое с первого взгляда является непрерывным (давление жидкости и газа, электрический ток и др.), имеет конечное число достоверно различимых градаций, определяемых его естественной флуктуацией.

Самым обобщенным показателем устройства является энергетический порог чувствительности C,

$$C = \gamma^2 P t, \tag{1.16}$$

где P — потребляемая мощность; γ — погрешность прибора; t — время установления результата измерения.

Таким образом, энергетический порог чувствительности C измерительного устройства есть произведение квадрата погрешности на потребляемую мощность и на время установления результата измерения.

Энергетический порог чувствительности любого измерительного устройства не может быть ниже $3{,}5 \cdot 10^{-20}$ Дж. Современные магнитоэлектрические гальванометры имеют порог 10^{-16} Дж.

Выражение для C и его предельное значение $3{,}5 \cdot 10^{-20}$ Дж показывает, что возможность повышения точности измерительных устройств, их быстродействия и потребления энергии от объекта измерения принципиально ограничены.

Общее уравнение любого измерительного устройства может быть записано в виде

$$\gamma^2 P t \eta_э = 3{,}5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \text{const}, \tag{1.17}$$

где $\eta_э$ — энергетический кпд.

Из этой формулы может быть сделан единственный вывод: если невозможно дальнейшее повышение энергетического кпд $\eta_э$ устройства, повышение какого-либо показателя прибора возможно лишь за счет других его показателей.

Такое соотношение, найденное для амплитудной модуляции, может быть получено для временной, частотной и кодо-амплитудной модуляций. Анализ показывает, что амплитудная модуляция уступает всем другим видам модуляций.

§ 1.16. Пути совершенствования измерительных приборов

Возможные пути совершенствования измерительных устройств могут быть сформулированы так.

1. Технологический путь — поиск и использование наиболее эффективных физических явлений (радиоэлектроника, молекулярные и внутриатомные явления и т. д.), тщательный отбор и отработка конструкций, подбор материалов и технологии производства. Этот путь является наиболее старым, устоявшимся и накопившим большой опыт в истории развития приборостроения.

2. Использование запаса чувствительности для расширения рабочего диапазона приборов.

С целью построения электрических приборов с широким диапазоном на базе узкодиапазонных измерительных преобразователей с большим запасом чувствительности применяются шунты, добавочные сопротивления и другие устройства для изменения пределов измерения. Этот путь ограничен снизу запасом чувствительности исходного измерительного преобразователя, а сверху — той предельной мощностью, которую может отдать прибору данный объект измерения.

3. Использование запаса чувствительности для повышения точности измерительных устройств путем применения метода уравновешивающего преобразователя (мостовые и компенсационные методы измерения).

В этом случае расширяются также и пределы измерения, но в отличие от предыдущего случая во столько же раз увеличивается и точность измерения. Это один из наиболее перспективных путей совершенствования измерительных устройств.

4. Использование запаса быстродействия для создания стабильных измерительных устройств на нестабильных элементах.

Для этой цели измерительное устройство может содержать одну-единственную стабильную меру и путем проведения дополнительных измерений этой меры до и после измерения интересующей нас величины исключать систематические погрешности. Этот прием дает существенный выигрыш в точности метрологических работ при резком снижении требований к стабильности и стоимости многочисленных элементов всего прибора.

5. Использование запаса быстродействия для уменьшения случайных погрешностей измерительных устройств.

Этот метод борьбы со случайными погрешностями основан на уменьшении среднеквадратической погрешности при увеличении числа наблюдений (измерений)

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad (1.18)$$

где σ — среднеквадратическая ошибка отдельного наблюдения; $\sigma_{\bar{x}}$ — среднеквадратическая погрешность среднеарифметического; n — число наблюдений (измерений).

Для заметного уменьшения случайной погрешности усредненного результата число отдельных обрабатываемых наблюдений должно быть весьма велико. При использовании современных быстродействующих измерительных устройств это направление может считаться весьма перспективным.

Следует, однако, иметь в виду, что пути в этом направлении сильно ограничиваются, если измеряемая величина быстро изменяется во времени.

6. Повышение точности или быстродействия за счет увеличения потребляемой мощности от объекта измерения.

Поскольку быстродействие может быть обменено на повышение точности, то для повышения быстродействия имеется единственный путь — увеличение полезного энергетического обмена прибора с объектом измерения. При этом вносимая прибором методическая погрешность может быть учтена либо при тарировке прибора, либо путем двухкратного измерения при двух различных входных сопротивлениях прибора.

§ 1.17. Структура электрических приборов для измерения неэлектрических величин

Любой прибор для измерения неэлектрических величин, как правило, состоит из отдельных конструктивных узлов. Каждый из узлов прибора в свою очередь состоит из отдельных элементарных измерительных преобразователей, соединенных между собой тем или иным способом. Виды измерительных преобразователей, входящие в прибор, их число и способы соединения между собой определяют свойства прибора, его точность, быстродействие и надежность работы. Для создания измерительного прибора используются различные измерительные преобразователи. Разумеется, наибольший интерес представляют преобразователи неэлектрических величин в электрические и обратно (обратные преобразователи).

В качестве примера рассмотрим электрический прибор для измерения скорости течения воды (рис. 1.6).

Приемник гидродинамического давления *1* в виде шара или пластинки вводится в измеряемую точку потока. Между скоростью течения v и величиной сопротивления F, оказываемого потоком на находящееся в нем тело, существует зависимость

$$F = C_x \frac{1}{2} \rho \omega v^2, \qquad (1.19)$$

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

где C_x — коэффициент сопротивления, зависящий от формы тела и числа Рейнольдса Re; ρ — плотность воды; ω — площадь проекции тела, нормальная направлению скорости; v — скорость потока воды.

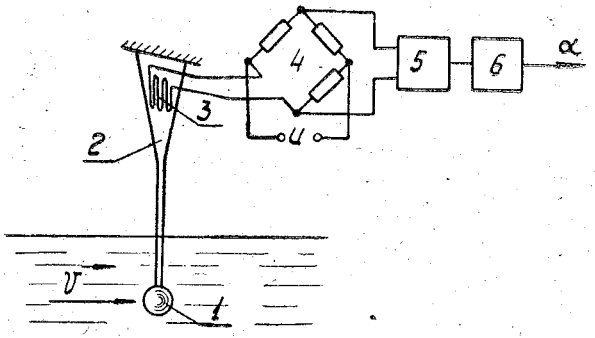


Рис. 1.6. Схема электрического прибора для измерения скорости течения воды:
1 — приемник гидродинамического давления; *2* — балка; *3* — тензометрический преобразователь; *4* — измерительный мост; *5* — усилитель; *6* — гальванометр.

Гидродинамическое сопротивление приемника давления вызывает деформацию балки *2* и наклеенного на нее тензометрического преобразователя *3*.

Относительная деформация балки равного сопротивления равна

$$\varepsilon_l = \frac{6L}{Ebh^2} F, \tag{1.20}$$

где L — расстояние от центра приемника давления до точки защемления балки; E — модуль упругости; b — максимальная ширина балки; h — толщина балки.

Деформация тензопреобразователя приводит к изменению его активного сопротивления, причем между относительным изменением сопротивления ε_R тензопреобразователя и его относительной деформацией ε_l существует зависимость

$$\varepsilon_R = K\varepsilon_l, \tag{1.21}$$

где K — коэффициент относительной тензочувствительности преобразователя.

Изменение сопротивления тензопреобразователя приводит к разбалансу моста Уитсона *4* и появлению на его выходе напряжения, равного

$$U_{вых}=S_u \varepsilon_R, \qquad (1.22)$$

где S_u — чувствительность моста по напряжению.

Напряжение, усиленное усилителем *5*, поступает на рамку гальванометра *6*.

Ток гальванометра равен

$$I_г=K_U \cdot \frac{1}{R_г} U_{вых}, \qquad (1.23)$$

где K_U — коэффициент усиления усилителя по напряжению; $R_г$ — сопротивление рамки гальванометра.

Отклонение рамки гальванометра пропорционально току

$$\alpha=S_I \cdot I_г, \qquad (1.24)$$

где S_I — чувствительность гальванометра по току.

Таким образом, между углом отклонения рамки гальванометра и скоростью течения воды имеет место функциональная зависимость, а вся цепь преобразования может быть представлена в виде

$$v \to F \to \varepsilon_l \to \varepsilon_R \to U_{вых} \to I_г \to \alpha. \qquad (1.25)$$

Структура такого прибора может быть изображена (рис. 1.7) в виде последовательного соединения шести измерительных преобразователей, из которых два первых — чисто неэлектрические, четвертый и пятый — чисто электрические, третий преобразует неэлектрическую величину в параметр электрической цепи (активное сопротивление), а шестой, наоборот, электрическую величину преобразует в механическое перемещение стрелки, т. е. является обратным измерительным преобразователем.

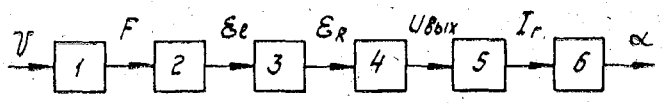


Рис. 1.7. Структура электрического прибора для измерения скорости течения воды:
1 — приемник гидродинамического давления; *2* — балка; *3* — тензометрический преобразователь; *4* — измерительный мост; *5* — усилитель; *6* — гальванометр.

Такое представление измерительного прибора значительно облегчает анализ его работы, позволяет определять свойства всего прибора по известным свойствам отдельных измерительных пре-

образователей. Однако прежде чем изучать отдельные измерительные преобразователи неэлектрических величин в электрические, необходимо рассмотреть общие свойства, касающиеся любого измерительного преобразователя.

§ 1.18. Общие свойства измерительных преобразователей

Каждый измерительный преобразователь конструируется так, чтобы из всего множества одновременно действующих на него физических величин он воспринимал только одну, которую называют естественной входной величиной преобразователя.

Выходной величиной измерительного преобразователя называется величина, в которую преобразуется естественная входная величина.

Характеристика преобразователя — это функциональная зависимость выходной величины от входной, описываемая аналитическим выражением, графиком или таблицей.

Например, характеристика гидрометрической вертушки может быть представлена в виде уравнения гиперболы

$$n=\alpha v-\sqrt{\beta v^2+\gamma}, \qquad (1.26)$$

где n — угловая скорость вертушки, об/с; v — скорость потока воды, м/с; α, β, γ — параметры вертушки.

Обычно стремятся иметь линейную характеристику преобразования $y=f(x)$, поскольку для ее описания достаточно двух параметров: начального значения выходной величины y_0 и показателя относительного наклона характеристики S, называемого чувствительностью преобразователя

$$y=y_0+Sx. \qquad (1.27)$$

В общем случае

$$S=\frac{dy}{dx}\simeq\frac{\Delta y}{\Delta x}. \qquad (1.28)$$

Чувствительность преобразователя — величина именованная, зависящая от природы входной и выходной величин.

Предел преобразования данного преобразователя — это максимальное значение входной величины x_m, которое может быть воспринято без искажения или повреждения преобразователя.

Порог чувствительности Δ_0 — минимальное значение входной величины, которое можно уверенно обнаружить с помощью данного преобразователя.

Полным или динамическим диапазоном преобразователя называется отношение предела преобразования к порогу чувствительности

$$D_n = \frac{x_m}{\Delta_0}. \qquad (1.29)$$

Каждый измерительный преобразователь обладает погрешностями. По характеру проявления можно выделить несколько видов погрешностей:

а) нелинейность — систематическое отклонение характеристики от идеализированной функции (линейной, квадратичной, логарифмической и др.);

б) гистерезис (вариация) — зависимость характеристики от направления изменения входной величины;

в) разброс — случайные неповторяющиеся отклонения отдельных точек характеристики, полученные в одинаковых условиях;

г) погрешность градуировки — отклонение, вызванное не лучшим выбором параметров номинальной характеристики;

д) дрейф (старение) — самопроизвольное изменение характеристики во времени;

е) дополнительные погрешности — изменение характеристики под действием посторонних факторов (температуры, атмосферного давления, влажности, вибрации и т. д.).

Все измерительные преобразователи являются инерционными и для выполнения преобразования требуют некоторого времени. При измерении ими изменяющихся во времени величин возникают динамические погрешности.

Глава II

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

А. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромеханические преобразователи включают в себя резистивные, электростатические и электромагнитные преобразователи.

§ 2.1. Резистивные преобразователи

Резистивные преобразователи делятся на контактные, реостатные и тензопреобразователи.

а. Контактным преобразователем (КП) называется преобразователь, в котором измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью.

Простейший КП является однопредельным и имеет одну пару контактов (рис. 2.1).

Чаще всего используются двухпредельные КП (рис. 2.2).

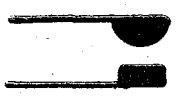


Рис. 2.1. Однопредельный контактный преобразователь.

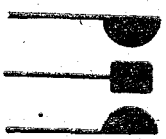


Рис. 2.2. Двухпредельный контактный преобразователь.

Характеристики КП представляют собой ступенчатые функции изменения сопротивления, напряжения или тока в зависимости от схемы включения их в электрическую цепь.

Порог чувствительности определяется в основном минимальным расстоянием d между контактами, значение которого ограничивается опасностью пробоя или возникновения дуги (или искры). Величина d не может быть меньше 1—2 мкм. Для уменьшения дуги и искры применяют цепи искрогашения, содержащие конденсатор C и сопротивление R (рис. 2.3), подбираемые опытным путем.

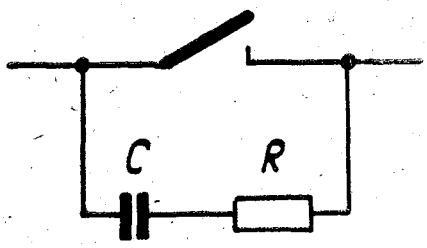


Рис. 2.3. Цепь искрогашения контактного преобразователя.

Мощность в цепи, разрываемой контактами, ограничивают величиной 100—150 мВт. В противном случае приходится использовать усилители (релейные, электронные, магнитные и др.).

В качестве материала контактов используются платина, вольфрам, молибден и их сплавы, а также серебро и золото.

КП выходят из строя из-за эрозии (разрушение поверхности контактов при прохождении электрического тока), коррозии (образование оксидных, сульфидных и др. пленок на поверхности контактов) и механического износа.

Благодаря своей простоте КП находят широкое применение в гидрометеорологическом приборостроении. Преимущественное распространение они получили в качестве контактного устройства гидрометрических вертушек. КП широко используются в уровнемерах (К. Д. Завьялова и А. М. Димаксяна).

В гидростатическом уровнемере УДВ-1 при перемещении щупа в рабочей трубке манометра образуется контакт между щупом и поверхностью ртути, который управляет работой реле, прекращающего счет числа импульсов и дающего команду на возвращение щупа в исходное (реперное) положение. Преобразование угла поворота вала двигателя и, следовательно, перемещения связанного с ним щупа в число импульсов, а также остановка двигателя в верхнем (реперном) и нижнем (аварийном) положениях также осуществляются с помощью КП.

6. Реостатным преобразователем (РП) называется реостат, движок которого перемещается в соответствии со зна-

чением измеряемой неэлектрической величины. РП выполняются как с проводом, намотанным на каркас (рис. 2.4), так и реохордного типа.

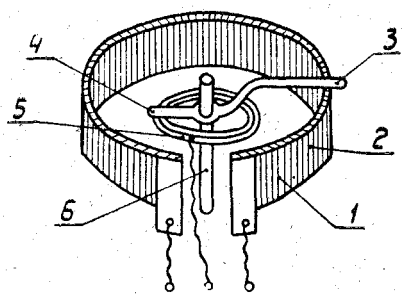


Рис. 2.4. Реостатный преобразователь кругового типа:
1 — проволока; *2* — каркас; *3* — движок; *4* — щетка; *5* — токоподвод; *6* — ось.

В качестве материала провода чаще всего применяют манганин, константан и фехраль. В ответственных случаях — сплав платины с иридием, палладием, рубидием, рутением или осмием.

Провод РП должен быть покрыт либо эмалью, либо слоем окислов, изолирующих соседние витки друг от друга. Движок РП выполняется в виде двух-трех проволок, изготовленных из сплава платины с иридием или бериллием, либо в виде пластинчатых щеток из серебра или фосфористой бронзы. Величина контактного давления РП может достигать $(5—10) \cdot 10^{-3}$ Н.

Характеристика РП, подобно контактным, представляет ступенчатую функцию (за исключением преобразователей реохордного типа). Число витков проволочного РП обычно выбирают не менее 100—200.

Очень часто используются функциональные РП, что достигается изменением высоты каркаса, применением намотки с переменным шагом, намоткой отдельных участков каркаса проводами разного диаметра или проводами с разными удельными сопротивлениями.

Характер шкалы прибора с РП зависит также и от параметров измерительной цепи.

Основные схемы включения реостатных преобразователей в цепь изображены на рис. 2.5, 2.6 и 2.7.

Линейность изменения тока от перемещения l движка зависит от отношения $\frac{R_{ук}}{R_р}$. Обычно это отношение делают равным $10 \div 20$,

чтобы нелинейность не превышала 1—2%. Плотность тока в проволоке РП не должна превышать 5 А/мм².

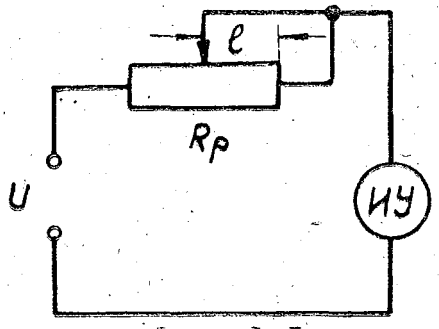


Рис. 2.5. Реостатная схема включения реостатного преобразователя.

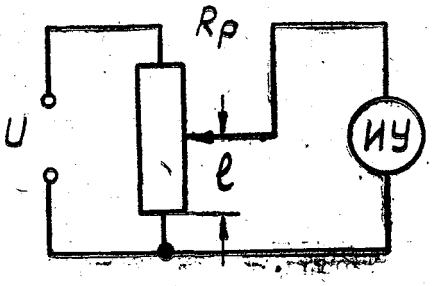


Рис. 2.6. Потенциометрическая схема включения реостатного преобразователя.

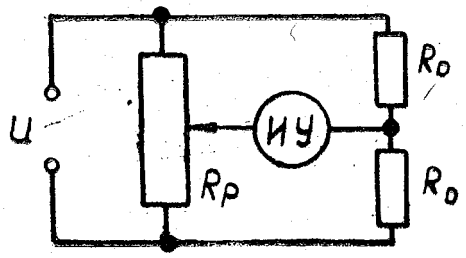


Рис. 2.7. Мостовая схема включения реостатного преобразователя.

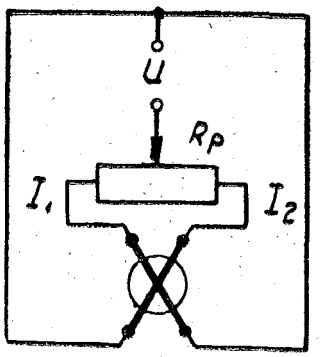


Рис. 2.8. Схема включения реостатного преобразователя в цепь с логометром.

Другим недостатком этих схем является зависимость тока указателя от величины питающего напряжения U. Для устранения этого недостатка, там где это возможно, в качестве указателя используют логометр (рис. 2.8).

РП используются в гидростатическом профилографе (для преобразования гидростатического давления и вызываемого им прогиба мембраны в изменение сопротивления потенциометра), в измерителе течений ГР-42 (в потенциометрическом дистанционном компасе) и электротермометрах ГР-41 и ГР-51 (в качестве реохорда для уравновешивания измерительного моста).

в. Тензопреобразователи (ТП). В основе работы ТП лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации.

Как известно, сопротивление проводника выражается формулой

$$R=\rho\frac{l}{S}. \qquad (2.1)$$

При деформации (растяжении или сжатии) проводника изменяются все величины, входящие в эту формулу.

Характеристикой тензоэффекта материала является зависимость относительного изменения сопротивления тензопреобразователя от относительной деформации

$$\frac{\Delta R}{R}=K\frac{\Delta l}{l} \text{ или } \varepsilon_R=K\varepsilon_l. \qquad (2.2)$$

Коэффициент K носит назнание коэффициента относительной тензочувствительности.

ТП (рис. 2.9) представляет собой решетку из тонкой проволоки *1* диаметром 0,01—0,04 мм, зигзагообразно уложенной узкими петлями длиной 5—40 мм и приклеенной к основе *2* — полоске бумаги или пленке клея. Для предохранения от механических повреждений проволока сверху покрывается слоем бумаги или клея. К концам проволоки привариваются полоски *3* из медной фольги для подпайки проводов. ТП одним из эластичных клеев (целлулойдным бакелитофенольным БФ-2, БФ-4 и др.) приклеивается к поверхности чувствительного элемента *4*, воспринимающего давление, усилие или перемещение, которое нужно измерить.

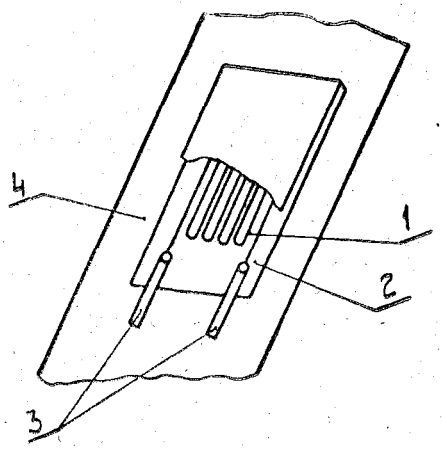


Рис. 2.9. Проволочный тензопреобразователь:
1 — проволока; *2* — основа; *3* — фольга; *4* — упругий элемент.

Направление проволоки должно совпадать с направлением ожидаемых деформаций.

Так как ε_l в области упругих деформаций не превосходит $2{,}5 \cdot 10^{-3}$, а коэффициент $K = 1{,}8—2{,}2$, то изменение сопротивления составляет всего 0,5%. Такое незначительное изменение сопротивления требует весьма чувствительных мостовых схем, малой величины температурного коэффициента сопротивления и термоэдс материала в паре с медью. Наибольшее распространение получили ТП из константана. В последнее время стали широко применять фольговые ТП, изготовляемые путем травления, и пленочные, получаемые возгонкой тензочувствительного, главным образом, полупроводникового материала и конденсацией его на чувствительный элемент или подложку.

ТП являются практически безынерционными преобразователями и широко используются для измерения быстро меняющихся во времени величин (пульсаций скоростей, давлений и т. п.).

§ 2.2. Электростатические преобразователи

Электростатические преобразователи включают в себя емкостные, пьезоэлектрические и электретные преобразователи.

а. Емкостный преобразователь (ЕП) является конденсатором. Емкость C плоского конденсатора выражается формулой.

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{\delta}, \tag{2.3}$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; S — поверхность обкладок, м^2; δ — расстояние между обкладками, м.

В подавляющем большинстве случаев практического использования ЕП их естественной входной величиной является геометрическое перемещение электродов относительно друг друга.

Наибольшее распространение получили ЕП, в которых происходит изменение зазора δ, так как емкостное сопротивление, равное

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega\varepsilon S}\delta, \tag{2.4}$$

оказывается пропорционально δ.

Поскольку величины емкости преобразователя невелики, мост питается током повышенной частоты (десятки и сотни килогерц).

Для увеличения чувствительности стремятся увеличивать напряжение, прикладываемое к обкладкам конденсатора. Однако из-за опасности пробоя напряженность поля между обкладками в

воздушном промежутке не должна превышать 700 В/мм. Кроме того, при этом возникает сила $f_э$ электростатического притяжения, равная

$$f_э = \varepsilon \frac{U^2}{2} \frac{S}{\delta^2}, \qquad (2.5)$$

где U — напряжение между обкладками.

Это свойство ЕП используется для создания обратных преобразователей напряжения в механическую силу.

В дифференциальных преобразователях (рис. 2.10) силы, действующие между парами пластин, направлены встречно и компенсируют друг друга.

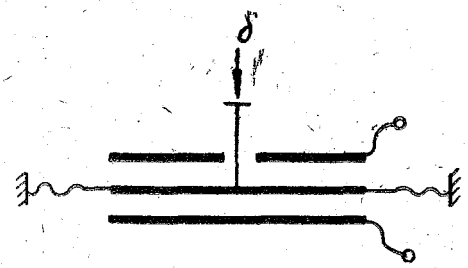


Рис. 2.10. Емкостный дифференциальный преобразователь.

ЕП для измерения малых перемещений отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм), линейностью, малыми размерами, простотой конструкции и легкостью подвижной части.

Достоинством ЕП с переменной площадью пластин является возможность выбором формы пластин получить желаемую функциональную зависимость.

В лабораторной практике часто используются емкостные уровнемеры (рис. 2.11). Емкость двух конденсаторов, включенных параллельно, равна (рис. 2.11,*а*)

$$C = C_1 + C_0 = [\varepsilon l + \varepsilon_0 (l_0 - l)] \frac{2\pi}{\ln \frac{R_1}{R_2}}, \qquad (2.6)$$

где l_0 — высота цилиндрического конденсатора; l — длина погруженной части в непроводящую жидкость; ε — диэлектрическая проницаемость жидкости; R_1 и R_2 — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Если жидкость проводящая, то она может использоваться в качестве одной обкладки конденсатора (рис. 2.11,*б*).

В этом случае

$$C = \varepsilon_1 l \frac{2\pi}{\ln \frac{R_1+\delta}{R_1}}, \qquad (2.7)$$

где δ — толщина изоляций; ε_1 — диэлектрическая проницаемость материала изоляции.

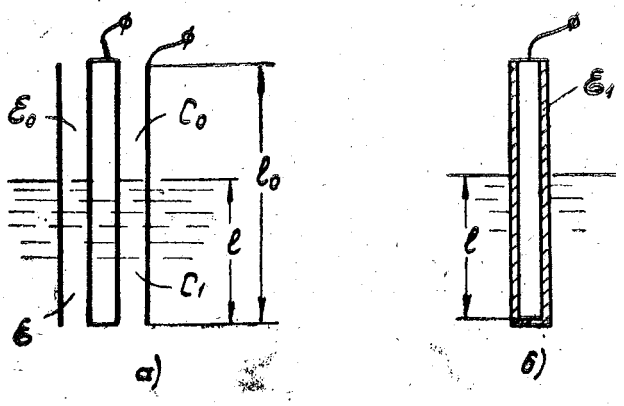


Рис. 2.11. Емкостные преобразователи, используемые для измерения уровня непроводящих (*а*) и проводящих (*б*) жидкостей.

б. Пьезоэлектрические преобразователи (ПП). Различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффекты. Прямой пьезоэлектрический эффект состоит в появлении электрических зарядов на гранях некоторых диэлектриков под влиянием механических напряжений. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в том, что у пьезоэлектриков, помещенных в электрическое поле, происходит изменение геометрических размеров.

Величина зарядов q, возникающих на гранях пьезоэлектрика, пропорциональна приложенной силе F

$$q = d_1 \cdot F, \qquad (2.8)$$

где d_1 — пьезоэлектрическая постоянная или пьезоэлектрический модуль.

Для кварца $d_1 = 2{,}1 \cdot 10^{-12} \frac{К}{Н}$, титаната бария — $107 \cdot 10^{-12} \frac{К}{Н}$, а для сегнетовой соли — $3000 \cdot 10^{-12} \frac{К}{Н}$.

Пьезоэлектрические свойства сохраняются лишь для определенной температуры (точка Кюри). Точка Кюри для этих пьезо-

электриков составляет 573° С, 300—350° С и 25° С соответственно. Диэлектрические проницаемости ε их равны 4,5; 1350 и 9000. Наибольшее применение в настоящее время нашла керамика на основе титаната бария, титаната ниобата и цирконата свинца.

ПП являются преобразователями генераторного типа и не требуют для своей работы источников питания. Однако они могут быть использованы лишь для измерения переменных во времени величин.

Эквивалентная схема таких преобразователей изображена на рис. 2.12.

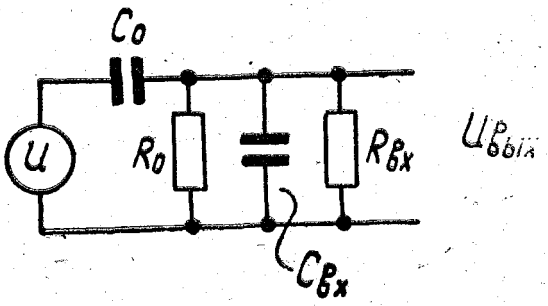


Рис. 2.12. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя: C_0 — собственная емкость преобразователя; $C_{вх}$ — емкость кабеля и входная емкость измерительной цепи; R_0 — сопротивление преобразователя с учетом сопротивления изоляции; $R_{вх}$ — входное сопротивление измерительной цепи.

Если $F = F_m \sin \omega t$, то $q = d_1 F_m \sin \omega t$, а

$$U = \frac{q}{C_0} = \frac{d_1 F_m}{C_0} \sin \omega t.$$

Действующее значение выходного напряжения равно

$$\dot{U}_{вых} = \frac{d_1 \dot{F}}{C_0} \cdot \frac{\dfrac{R \cdot \dfrac{1}{j\omega C_{вх}}}{R + \dfrac{1}{j\omega C_{вх}}}}{\dfrac{1}{j\omega C_0} + \dfrac{R \cdot \dfrac{1}{j\omega C_{вх}}}{R + \dfrac{1}{j\omega C_{вх}}}} = d_1 \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega R (C_{вх} + C_0)}, \quad (2.9)$$

где $R=\frac{R_0 \cdot R_{вх}}{R_0+R_{вх}}$.

Таким образом, $\dot{U}_{вых}=f(\omega)$. Если $\omega \to 0$, $\dot{U}_{вых} \to 0$; если $\omega R(C_{вх}+C_0) \gg 1$, то

$$\frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{E}}=\frac{d_1}{C_{вх}+C_0}=\text{const}. \qquad (2.10)$$

Для выполнения этого условия необходимо увеличение R, а не $C_{вх}$, так как при этом падает чувствительность.

В гидрометрии ПП используются в качестве генераторов и приемников ультразвуковых колебаний в различных эхолотах (ТОР-5, ЭПО-10, «Язь» и др.), кроме того, они используются для измерения пульсаций давления.

в. Электретные преобразователи (ЭП). Электретом называется диэлектрик, обладающий постоянной поляризацией (наэлектризованностью), т. е. имеющий на противоположных сторонах заряды разных знаков, сохраняющиеся (подобно постоянному магниту) в течение длительного времени.

Существует несколько способов получения электретов, причем, все они связаны с наложением на диэлектрик сильного электрического поля. Для изготовления электретов используются различные естественные и синтетические диэлектрики, например эбонит, слюда, нафталин, сера, титанат магния и др. Электреты имеют вид пластин, дисков, колец. Толщина их обычно составляет несколько миллиметров, диаметр дисков — несколько десятков миллиметров.

Электреты применяются в качестве источников постоянного электрического поля и характеризуются величиной поверхностной плотности электрического заряда $\sigma_{пов}$ порядка 10^{-1}—$10^{-5}\frac{К}{м^2}$.

Принцип действия ЭП основан на том, что при перемещении электрода в электрическом поле электрета (рис. 2.13) будет изменяться наведенный заряд $\sigma_{инд}$ на электроде, и во внешней цепи потечет ток i.

ЭП могут быть использованы в двух направлениях: для измерения скорости перемещения подвижного электрода относительно электрета и для измерения различных величин, влияющих на параметры электрета (σ и ε). В последнем случае подвижный электрод должен принудительно колебаться с постоянной частотой ω_0 и амплитудой δ_0. На параметры электрета оказывают сильное влияние атмосферное давление, относительная влажность воздуха и интенсивность радиоактивного излучения.

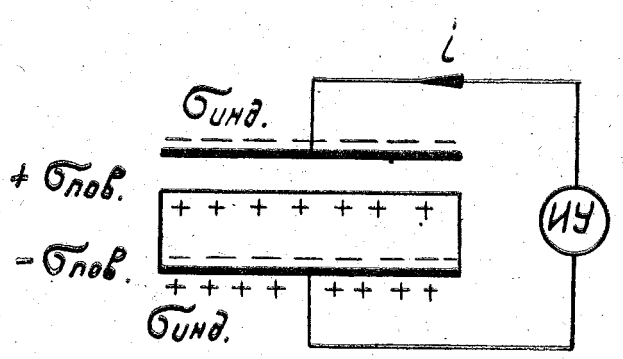


Рис. 2.13. Принцип действия электретного преобразователя.

Недостатком ЭП является нестабильность их заряда во времени. В измерительной технике в настоящее время они еще не нашли широкого применения.

§ 2.3. Электромагнитные преобразователи

Электромагнитные преобразователи включают в себя индуктивные, взаимоиндуктивные (трансформаторные), индукционные и магнитоупругие преобразователи.

а. Индуктивный преобразователь (ИП) представляет собой катушку с обмоткой, расположенную в магнитной цепи, состоящей из неподвижного и подвижного сердечников (рис. 2.14).

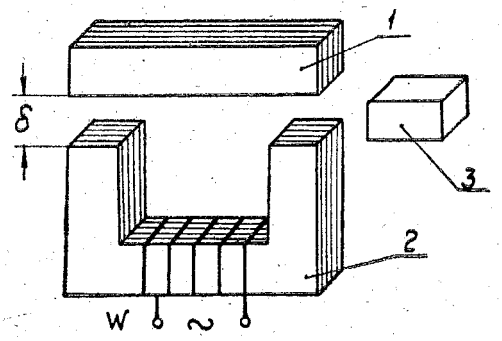


Рис. 2.14. Индуктивный преобразователь:
1 — подвижный сердечник; *2* — неподвижный сердечник; *3* — подвижная пластина из ферромагнитного или проводящего неферромагнитного материала.

Если обмотка имеет w витков, то индуктивность L ее равна

$$L=\frac{w^2}{R_м}=\frac{w^2}{R_{Мст}+R_\delta}=\frac{w^2}{R_{Мст}+\frac{2\delta}{\mu_0 S}}, \qquad (2.11)$$

где $R_м$, $R_{Мст}$ и R_δ — соответственно полное сопротивление магнитной цепи, магнитное сопротивление участков из стали и магнитное сопротивление воздушных зазоров; δ — величина воздушного зазора; S — площадь воздушного зазора; $\mu_0 = 1{,}26\cdot 10^{-6}\frac{Гн}{м}$ — магнитная проницаемость зазора.

Если изменять $R_м$, например, приближая подвижный сердечник *1* к неподвижному *2* (изменение δ) или поворачивая (сдвигая) сердечник *1* относительно неподвижной части магнитной цепи (изменение S), то при этом будет изменяться значение индуктивности L. Значение L можно изменять и при неподвижных сердечниках *1* и *2* путем введения в воздушный зазор пластины *3* из ферромагнитного материала или электропроводного неферромагнитного материала.

В последнем случае изменение L обусловлено размагничивающим действием токов, индуктированных в пластине основным магнитным потоком, проходящим по магнитной цепи.

Следовательно, у такого преобразователя естественный входной величиной является перемещение сердечника, а выходной — изменение индуктивности L обмотки.

Основные конструкции ИП представлены на рис. 2.15.

Индуктивное сопротивление катушек преобразователя равно

$$Z=R+j\omega\frac{w^2}{R_{Мст}+\frac{\delta}{\mu_0 S}}, \qquad (2.12)$$

где R — активное сопротивление провода обмотки и потери в стали.

Таким образом, между Z и δ имеет место гиперболическая (нелинейная) зависимость, вследствие чего при начальном зазоре δ_0 линейный участок характеристики ограничен значением $\Delta\delta = (0{,}1 \div 0{,}15)\delta_0$ (рис. 2.16).

Увеличить линейный участок характеристики можно путем использования дифференциальных преобразователей, обе катушки которых включены в два соседних плеча моста (рис. 2.17).

В этом случае ток в указателе при использовании симметричного моста ($Z_3 = Z_4 = Z_0$) зависит от разности сопротивлений плеч

$$\dot{I}_{ук} = \dot{U}\dot{Z}_0(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2), \qquad (2.13$$

где $Z_0 = Z_3 = Z_4$.

Как видно из рис. 2.18, при этом повышается крутизна характеристики, а линейность увеличивается до $(0{,}6 \div 0{,}8)\,\delta_0$, т. е. пределы преобразования увеличиваются раз в пять по сравнению с недифференциальным преобразователем. Использование дифференциальных преобразователей снижает, кроме того, погрешности, обусловленные колебаниями температуры, напряжения и частоты источников питания, а также старением.

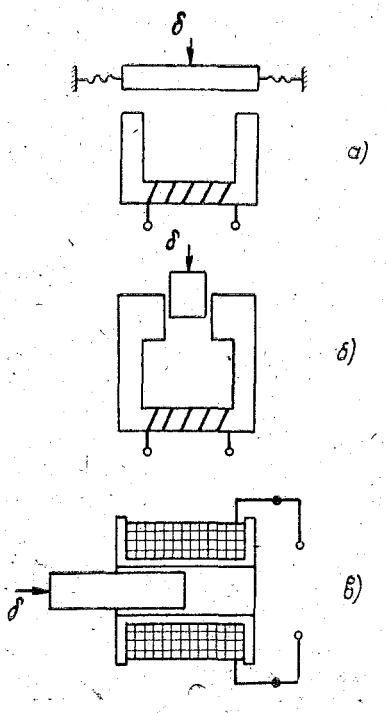


Рис. 2.15. Конструкции индуктивных преобразователей для измерения малых (*а*), средних (*б*) и больших (*в*) перемещений.

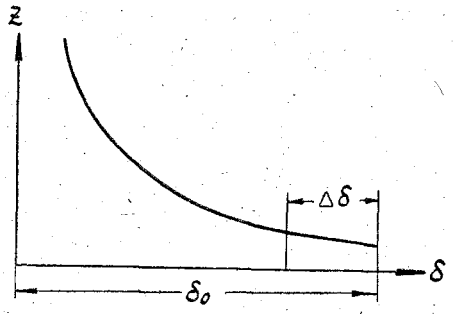


Рис. 2.16. Зависимость индуктивного сопротивления Z от перемещения δ сердечника индуктивного преобразователя.

Материалом сердечников, как правило, являются электротехнические стали с высоким значением магнитной проницаемости μ. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник набирается из тонких пластин, изготавливаемых штамповкой. Пластины изолируются друг от друга слоем кабельной бумаги, лака или пленкой окислов. Часто сердечники электромагнитных преобразователей делают из феррита.

Следует иметь в виду наличие электромеханической силы притяжения подвижного сердечника к неподвижному.

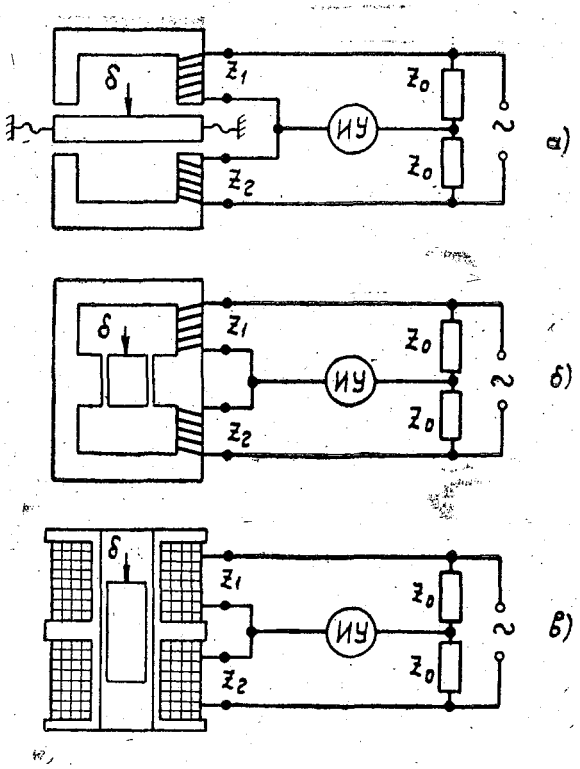


Рис. 2.17. Схемы включения индуктивных дифференциальных преобразователей в мостовую измерительную цепь для измерения малых (*а*), средних (*б*) и больших (*в*) перемещений.

$$F_э = (Iw)^2 \frac{S\mu_0}{\delta^2}. \qquad (2.14)$$

Это свойство ИП используется для создания обратных электромагнитных преобразователей электрического тока в механическую силу.

В дифференциальном преобразователе (рис. 2.17) электромеханические силы $F_э$ каждой половины направлены в противоположные стороны и компенсируют друг друга, однако полная компенсация существует лишь в среднем положении сердечника.

ИП могут работать на переменном токе промышленных частот 400 ÷ 500 Гц и даже 50 Гц.

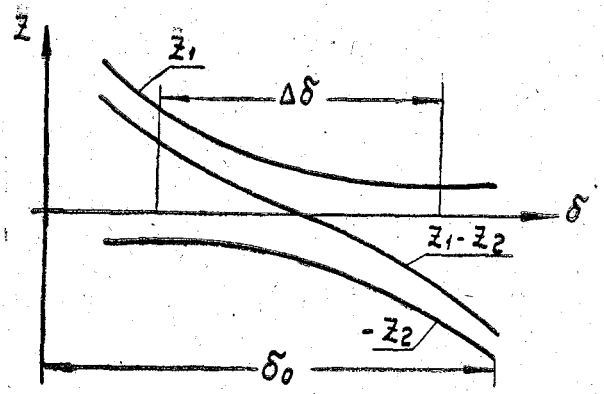


Рис. 2.18. Зависимость индуктивного сопротивления Z от перемещения δ сердечника в индуктивном дифференциальном преобразователе.

ИП благодаря своей простоте, надежности и чувствительности находят широкое применение для измерения угловых скоростей малогабаритных вертушек, измерения постоянной и переменной составляющих гидростатического давления, а также для измерений перемещений и всех тех величин, которые могут быть предварительно преобразованы в перемещение.

б. Трансформаторный преобразователь (ТП). Если в магнитную цепь поместить не одну, а две катушки (рис. 2.19,*а*), то при изменении магнитного сопротивления $R_м$ будет изменяться взаимная индуктивность M между обмотками катушек, равная

$$M = \frac{w_1 w_2}{R_м} = \frac{w_1 w_2}{R_{м_{ст}} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}}, \qquad (2.15)$$

где w_1 и w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток.

Если в таком преобразователе через обмотку w_1 пропущен переменный синусоидальный ток, то во вторичной обмотке будет индуктироваться эдс

$$e = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -w_2 \omega \Phi = -w_2 \omega \frac{w_1 I_1}{R_м}, \qquad (2.16)$$

где ω — круговая частота переменного тока; I_1 — ток в первичной обмотке; Φ — магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой.

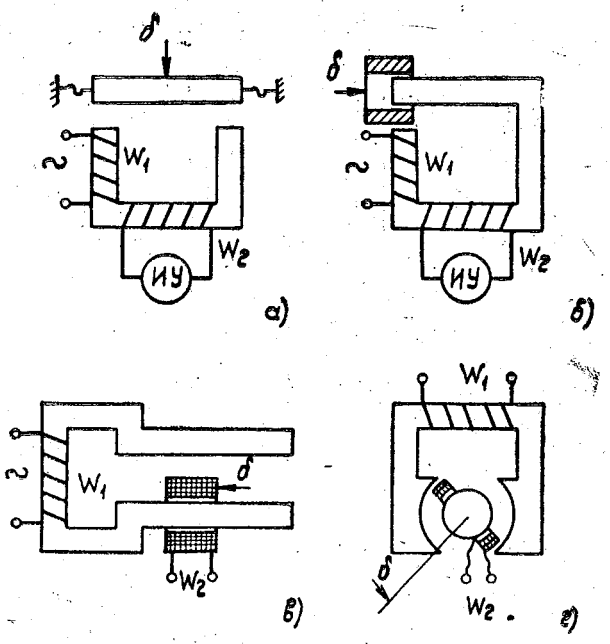


Рис. 2.19. Конструкции трансформаторных преобразователей для измерения малых (*а*), средних (*б*), больших (*в*) линейных и угловых (*г*) перемещений.

Преобразователи, преобразующие значение измеряемой (механической) величины в значение взаимной индуктивности или в индуктированную эдс, называются взаимоиндуктивными или трансформаторными (ТП).

Основные конструкции ТП изображены на рис. 2.19.

ТП также выполняются дифференциальными (рис. 2.20).

ТП обратимы. Если по первичной и вторичной обмоткам пропустить токи I_1 и I_2, то между катушками возникнет сила электромагнитного взаимодействия, пропорциональная произведению токов I_1 и I_2 катушек. Это свойство ТП положено в основу создания электродинамических (без сердечника) и ферродинамических (с сердечником) обратных преобразователей.

Так как выходной величиной ТП является напряжение, то они находят более широкое применение, чем индуктивные преобразователи, которые чаще используются в частотных датчиках (о частотных датчиках см. § 3.7).

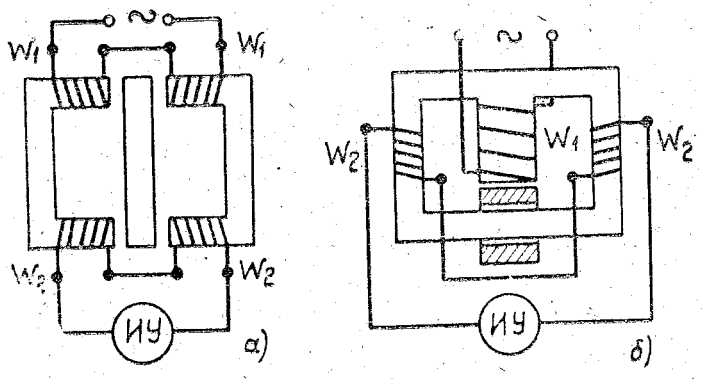


Рис. 2.20. Схемы включения трансформаторных дифференциальных преобразователей в измерительную цепь для измерения малых (*а*) и больших (*б*) перемещений.

в. Индукционный преобразователь ИП. Если в трансформаторном преобразователе (рис. 2.19) через обмотку w_1 пропущен постоянный ток, а обмотка w_2 помещена в воздушном зазоре, то при перемещении последней будет изменяться магнитный поток Ф, сцепленный с обмоткой w_2. Величина эдс, наведенной в обмотке w_2, будет пропорциональна скорости $\dot{\delta}$ перемещения обмотки в зазоре.

Подобные преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой (механической) величины преобразуется в индуктированную эдс, называются индукционными. Магнитный поток в ИП преобразователях чаще всего создается при помощи постоянных магнитов (рис. 2.21).

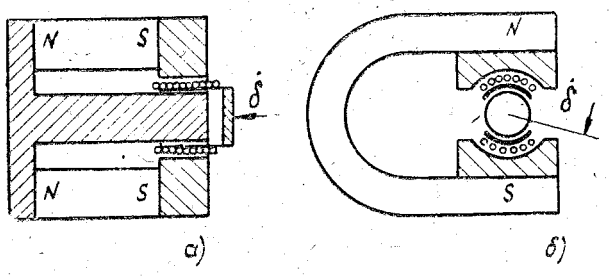


Рис. 2.21. Индукционные преобразователи для измерения линейной (*а*) и угловой (*б*) скоростей перемещения.

ИП также являются обратимыми. При прохождении тока по катушке возникает сила $F_м$ взаимодействия поля тока с полем постоянного магнита

$$F_м = BwIl, \tag{2.17}$$

где B — индукция в зазоре; w — число витков обмотки; l — длина витка; I — сила тока.

Такие обратные преобразователи называются магнитоэлектрическими и находят широкое применение в измерительной технике благодаря ряду достоинств: линейной зависимости силы от тока, стабильности, большой удельной силы (силы, приходящейся на единицу массы преобразователя).

г. Магнитоупругий преобразователь (МП). В некоторых преобразователях изменение полного сопротивления $R_м$ магнитной цепи осуществляется не за счет R_δ, а за счет $R_{м_{ст}}$, равного

$$R_{м_{ст}} = \frac{l_{ст}}{\mu S_{ст}}, \tag{2.18}$$

где $l_{ст}$ и $S_{ст}$ — длина и площадь поперечного сечения сердечника; μ — магнитная проницаемость сердечника.

Изменение $R_{м_{ст}}$ происходит за счет изменения μ при приложении к магнитной цепи сжимающих, растягивающих и скручивающих усилий. Такие преобразователи, у которых естественной входной величиной является упругая деформация сердечника, а выходной величиной — изменение индуктивности, взаимоиндуктивности или индуктированной эдс, называются магнитоупругими преобразователями (рис. 2.22).

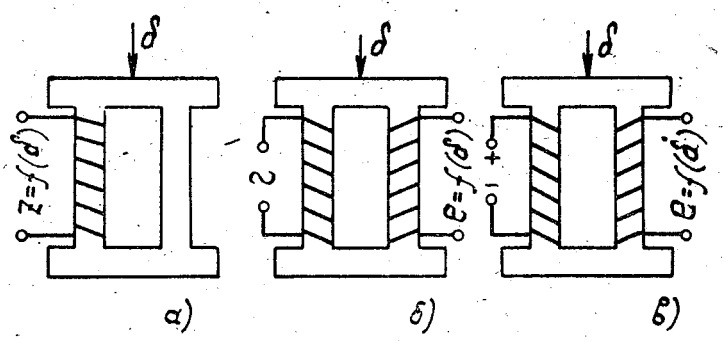


Рис. 2.22. Магнитоупругий индуктивный (*а*), трансформаторный (*б*) и индукционный (*в*) преобразователи.

Магнитоупругий эффект обратим. Если ферромагнитное тело внести в магнитное поле, то оно изменяет свои размеры (явление магнитострикции). Величина и знак магнитострикции зависят от материала магнитной цепи и напряженности магнитного поля (рис. 2.23), а также от термообработки и температуры.

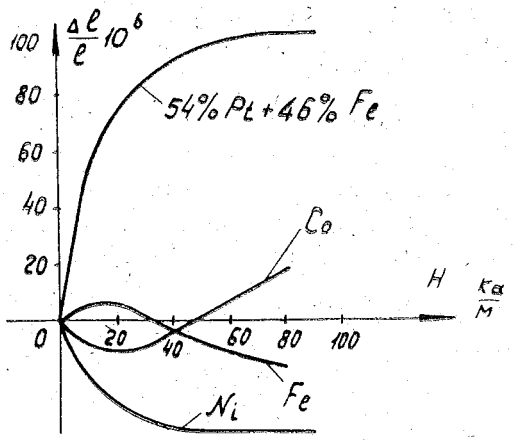


Рис. 2.23. Магнитоупругие свойства различных ферромагнитных металлов и сплавов.

Подобно тензочувствительным материалам вводят коэффициент относительной тензочувствительности магнитоупругого материала

$$K = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_l}. \qquad (2.19)$$

Коэффициент K для мягкой стали колеблется от 220 до 300.

В качестве материала магнитоупругих преобразователей чаще всего используется пермаллой, иногда пермендюр, альсифер, ферриты.

МП используется, главным образом, для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний в эхолотах.

Б. ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тепловые преобразователи включают в себя термосопротивления и термоэлектрические преобразователи.

§ 2.4. Термосопротивления

Термосопротивлением (ТС) называется проводник с большим температурным коэффициентом сопротивления, находящийся в теплообмене с окружающей средой.

Теплообмен со средой может происходить различными путями: конвекцией, теплопроводностью среды, теплопроводностью самого проводника и излучением.

Интенсивность теплообмена зависит от температуры газовой и жидкой среды и самого проводника, от физических свойств газовой и жидкой среды (плотность, теплопроводность, вязкость), скорости газовой и жидкой среды, геометрических размеров проводника и состояния его поверхности.

Зависимость температуры проводника и, следовательно, его сопротивления от перечисленных факторов может быть использована для измерения различных неэлектрических величин: температуры, скорости, концентрации, плотности, вязкости.

В качестве ТС используется тонкая проволока диаметром 0,02÷0,06 мм из чистых металлов (меди, никеля, платины) или полупроводники.

Конструкция проводниковых ТС изображена на рис. 2.24.

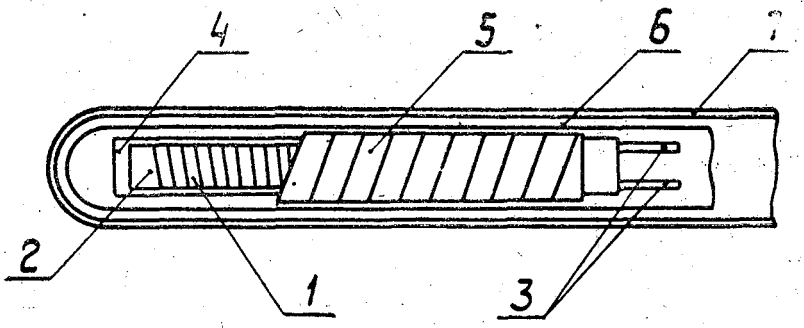


Рис. 2.24. Конструкция проводникового термосопротивления:
1 — проволока; *2* — каркас; *3* — проводники; *4* — изоляция; *5* — лента; *6* — экран; *7* — наружная защитная трубка.

Зависимость сопротивления металлов от температуры не является линейной, однако для большинства практических случаев пользуются линейной зависимостью.

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t), \qquad (2.20)$$

где α_0 — температурный коэффициент сопротивления; R_0 — сопротивление преобразователя при 0° С.

По ГОСТу на медную проволоку для термометров сопротивления в диапазоне температур от 0 до 100° С

$$\alpha_0 = 4{,}27 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{град}}. \qquad (2.21)$$

Для произвольного диапазона температур эта формула несколько видоизменяется. Из рис. 2.25 можно написать

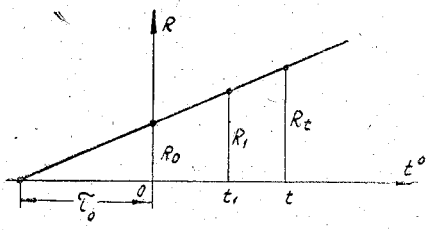


Рис. 2.25. Связь между сопротивлением и температурой в проводниковом термосопротивлении.

$$\frac{R_0}{\tau_0} = \frac{R_1}{\tau_0 + t_1} = \frac{R_t}{\tau_0 + t}, \qquad (2.22)$$

Отсюда

$$R_t = R_1 \frac{\tau_0 + t}{\tau_0 + t_1}. \qquad (2.23)$$

Так как

$$R_0 \alpha_0 = \frac{R_0}{\tau_0}, \quad \text{т. е. } \tau_0 = \frac{1}{\alpha_0},$$

то

$$R_t = R_1 \frac{1 + \alpha_0 t}{1 + \alpha_0 t_1}. \qquad (2.24)$$

Выбор материала преобразователя диктуется диапазоном температур и свойствами измеряемой среды (влажностью, агрессивностью).

Медная проволока может быть использована в диапазоне температур от —50 до 180° С в среде, свободной от влажности и корродирующих газов. Никель — в диапазоне температур до 250—300° С при хорошей изоляции от среды. При температурах до 100°С характеристика линейна (τ_0 = 150—170°).

Полупроводниковые ТС изготовляют из смеси окислов различных металлов (Cu, Co, Mn) путем обжига при высокой температуре для получения химического соединения.

Зависимость полупроводниковых сопротивлений от температуры имеет вид

$$R_t = Ae^{\frac{B}{T}}, \qquad (2.25)$$

где A — постоянная, зависящая от размеров, формы и физических свойств полупроводника; B — постоянная, зависящая только от физических свойств полупроводника; T — абсолютная температура термосопротивления.

Температурный коэффициент полупроводниковых ТС, равный

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}, \qquad (2.26)$$

отрицательный, сильно зависит от температуры, но в 6—10 раз больше, чем у проводниковых ТС.

Полупроводниковые ТС изготовляются в виде стержней, шайб, дисков и бусинок в открытом и герметизированном исполнении (рис. 2.26). Они пригодны для измерения температур в диапазоне от —100 до 120° С.

Номинальные значения сопротивления лежат в пределах от 1 до 200 кОм.

Недостатком всех полупроводниковых ТС является нелинейность и разброс их параметров.

Полупроводниковые ТС используются, главным образом, в сочетании с термонезависимыми сопротивлениями, улучшающими их линейность.

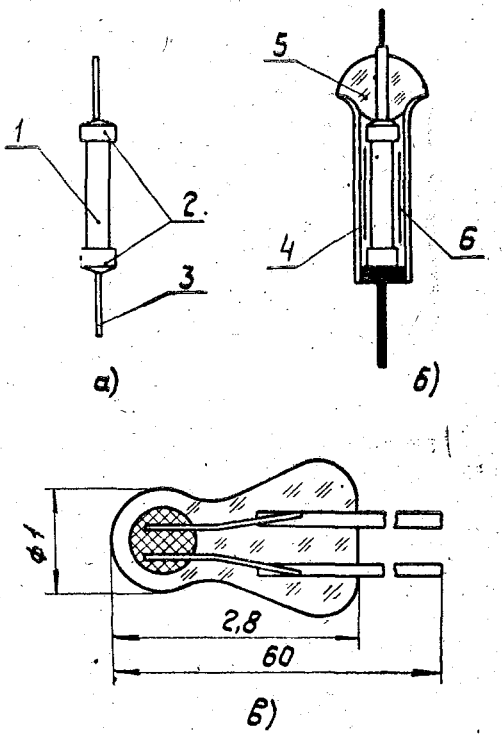


Рис. 2.26. Конструкции полупроводниковых термосопротивлений стержневого (*а*), стержневого в герметизированном исполнении (*б*) и бусинкового (*в*) типов:

1 — стержень из полупроводникового материала; *2* — токоподводящие электроды; *3* — проводники; *4* — корпус; *5* — стеклянный проходной изолятор; *6* — изоляция.

Для схемы, изображенной на рис. 2.27,*а*,

$$R_{экв} = \frac{R_t \cdot R_ш}{R_t + R_ш}, \qquad (2.27)$$

где R_t — термосопротивление; $R_ш$ — термонезависимое сопротивление.

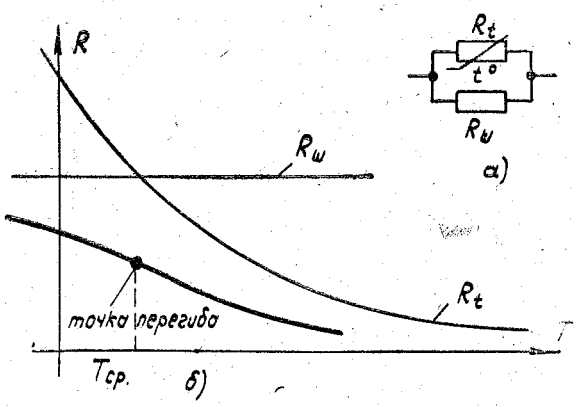


Рис. 2.27. Схема для линеаризации нелинейной зависимости полупроводникового термосопротивления (*а*) и зависимость сопротивления от температуры для такой схемы (*б*).

Зависимость $R_{экв}$ от температуры представлена на рис. 2.27,*б* жирной линией.

Выбирая точку перегиба в середине диапазона измерений температуры $T_{ср}$ можно резко уменьшить нелинейность ТС.

Измерительной цепью является любая цепь, предназначенная для измерения сопротивлений. Обычно используется цепь неуравновешенного моста с магнитоэлектрическим логометром в качестве указателя (рис. 2.28) и цепь автоматически уравновешиваемого моста (рис. 2.29). Для уменьшения погрешности от непостоянства температуры линии при дистанционных измерениях используется трехпроводная линия.

Чтобы не возникала погрешность от нагрева ТС протекающим по нему током, последний ограничивается величиной 10 ÷ 15 мА.

Для уменьшения тепловых потерь применяют все меры к уменьшению теплопроводности и излучения ТС.

В гидрометрии ТС широко используется в двух направлениях: измерение температуры воды и воздуха и измерение скорости воды (термогидрометры). Основным недостатком существующих тер-

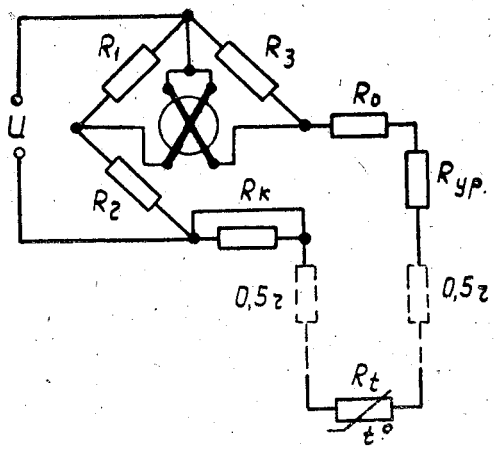


Рис. 2.28. Схема включения термосопротивления в цепь с логометром.

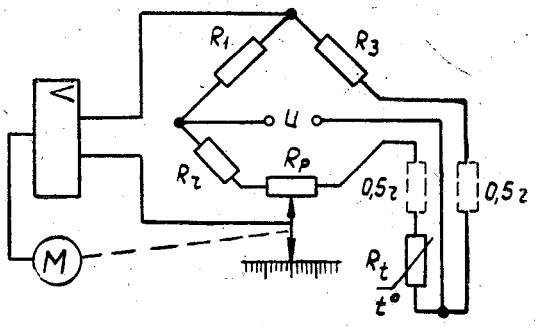


Рис. 2.29. Схема включения термосопротивления в цепь автоматически уравновешиваемого моста.

могидрометров является сильная зависимость показаний от температуры воды. Поэтому они используются, главным образом, для измерения пульсаций потока (турбулентности).

§ 2.5. Термоэлектрические преобразователи

Явление термоэлектричества заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) *A* и *B*, соединив их между собой концами (рис. 2.30), причем температуру *t* одного места соединения сделать отличной от

температуры t_0 другого, то в такой цепи появится эдс, называемая термоэлектродвижущей силой (термоэдс), являющаяся разностью функций температур мест соединения

$$E_{AB} = f(t) - f(t_0). \qquad (2.28)$$

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем (ТП), или иначе термопарой, проводники, составляющие термопару — термоэлектродами, а места их соединения — спаями.

Термопара может быть применена для измерения температуры. Если один спай термопары, называемый рабочим спаем, поместить в среду с температурой t, подлежащей измерению, а температуру другого t_0 — нерабочего — поддерживать постоянной, то $f(t_0) = \text{const} = C$ и

$$E_{AB} = f(t) - C = F(t). \qquad (2.29)$$

Естественной входной величиной ТП является температура t его рабочего спая, а выходной — тормоэдс, которую он развивает при строго постоянной температуре t_0 нерабочего спая.

Включение указателя в цепь ТП проводится по схемам рис. 2.31: а) с двумя нерабочими спаями, б) с одним нерабочим спаем и одинаковой температурой t_1 мест подключения измерительного устройства.

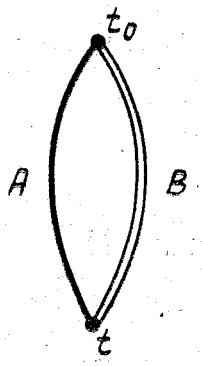


Рис. 2.30. Термоэлектрический преобразователь.

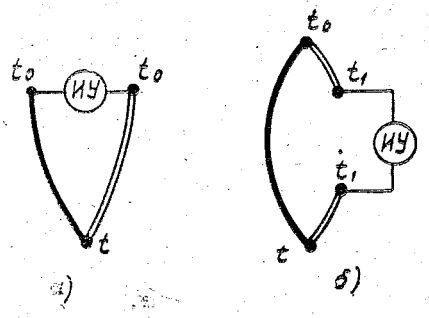


Рис. 2.31. Схемы включения термоэлектрического преобразователя в измерительную цепь с двумя нерабочими спаями (*а*) и с одним нерабочим спаем (*б*).

ТП изготавливается из различных сплавов. Наиболее широкое применение нашли сплавы: хромель (10% Cr + 90% Ni) — копель (56,5% Cr + 43,5% Ni). Термоэдс составляет 6,9 мВ на 100° С. Для

повышения чувствительности часто используют несколько ТП, включенных последовательно (термобатарея).

Следует иметь в виду, что термоэдс в значительной степени зависит от малейших примесей, механической и термической обработки.

Погрешность ТП преобразователей складывается из погрешности, обусловленной изменением температуры нерабочих спаев; погрешности, обусловленной изменением температур линии, термопары и указателя; погрешности, обусловленной тепловыми потерями и паразитными термоэдс.

Обычно градуировка ТП производится при температуре нерабочего спая 0° С. Всякое отклонение от этой температуры вызывает погрешность. Нерабочие спаи часто термостатируют и вводят поправку.

Если шкала приборов линейная или двойная, в градусах и милливольтах, то ввод поправки не вызывает затруднений. Если шкала нелинейна и только в градусах температуры, то (рис. 2.32)

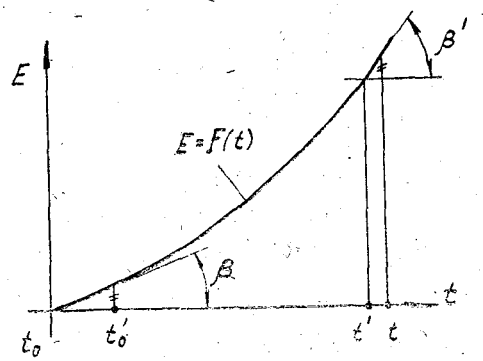


Рис. 2.32. Зависимость термоэдс термопары от температуры и введение поправок за изменение температуры нерабочего спая.

$$E(t_0't_0) = (t'_0 - t_0)\operatorname{tg}\beta = (t - t')\operatorname{tg}\beta', \qquad (2.30)$$

где $t'_0 - t_0$ — изменение температуры нерабочего спая; $t - t'$ — поправка к величине измеренной температуры; β и β' — углы наклона градуировочной кривой при температурах t_0 и t соответственно.

Отсюда

$$t - t' = (t_0' - t_0)\frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\beta'} = (t_0' - t_0)\,K, \qquad (2.31)$$

где K — поправочный коэффициент, даваемый таблицей для каждого диапазона температур.

Часто поправки вводят автоматически (рис. 2.33). Термосопротивление R_t помещают у нерабочих спаев. При температуре нерабочих спаев 0° С мост находится в равновесии. Если температура нерабочего спая отличается от 0° С, то мост выходит из равновесия, и к ТП добавляется напряжение, компенсирующее эдс за счет изменения температуры нерабочего спая.

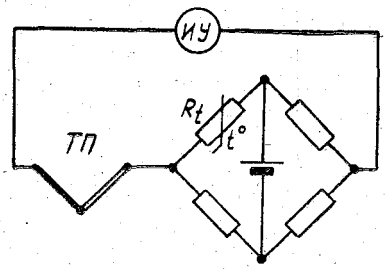


Рис. 2.33. Схема автоматического ввода поправки за изменение температуры нерабочего спая термопары.

В гидрометрии термопары используются для измерения температуры воды и воздуха.

Все тепловые преобразователи являются инерционными. Тепловая инерция определяется как время, в течение которого первоначальная разность температур между преобразователем и средой уменьшается в e раз (так называемая «постоянная времени»). Постоянная времени преобразователей зависит от их размеров и конструкции и колеблется от долей секунды до нескольких минут.

В. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электрохимические преобразователи включают в себя электролитические, гальванические, полярографические, химотронные и электрокинетические преобразователи.

В общем случае электрохимический преобразователь представляет собой электролитическую ячейку, заполненную раствором с помещенными в него двумя или несколькими электродами, служащими для включения преобразователя в измерительную цепь.

§ 2.6. Электролитические преобразователи

Принцип действия электролитических преобразователей (ЭЛП) основан на зависимости сопротивления электролитической ячейки от состава и концентрации электролита, а также от геометрических размеров ячейки.

Сопротивление столба жидкости равно

$$R=\rho\frac{l}{S}=\frac{1}{\gamma}K, \qquad (2.32)$$

где $\gamma=\frac{1}{\rho}$ — удельная проводимость электролита; K — постоянная преобразователя, зависящая от соотношения его геометрических размеров, определяемая обычно экспериментально.

При постоянной концентрации электролита изменение сопротивления преобразователя может быть вызвано изменением расстояния между электродами или изменением сечения электролита. На этом основано действие ЭЛП для измерения механических линейных x и угловых α перемещений. Для уменьшения температурной погрешности ЭЛП перемещения они обычно выполняются дифференциальными (рис. 2.34).

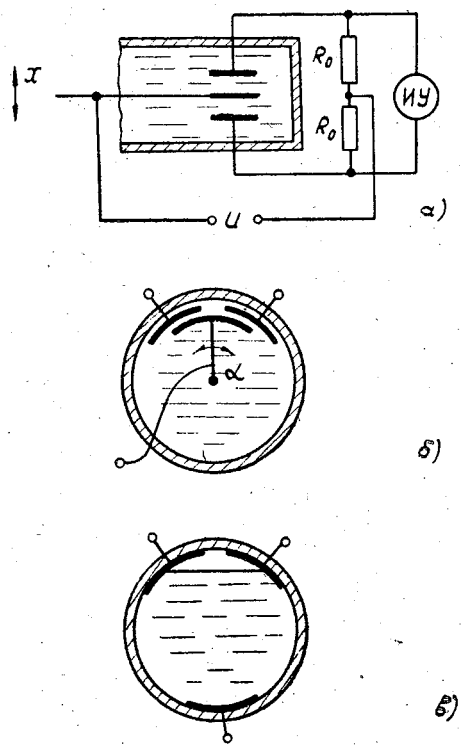


Рис. 2.34. Конструкции электролитических преобразователей для измерения линейного (*а*) и угловых (*б*) и (*в*) перемещений.

4

В качестве электролита часто применяется 1,2 N водный раствор $CuSO_4$. Питание ЭЛП производится переменным током.

В гидрометрии ЭЛП широко используются в качестве измерительных устройств для измерения уровней воды и измерения числа оборотов микровертушек.

Если расстояние между электродами и площадь их не меняются, то ЭЛП могут быть использованы для измерения концентрации электролитов. Такие преобразователи, в частности, используются в электролитическом измерителе расхода воды (ЭИРВ) ГР-54 (см. § 7.2).

Основной погрешностью ЭЛП является температурная погрешность, от удачного решения вопроса коррекции которой зависит точность работы прибора. Зависимость проводимости электролита от температуры может быть использована для измерения температуры.

§ 2.7. Гальванические преобразователи

Между двумя электродами, опущенными в раствор электролита, вследствие химических процессов возникает разность потенциалов, т. е. электролитическая ячейка является источником эдс.

Потенциал электрода относительно раствора, в который он опущен, называется в электрохимии электродным потенциалом.

Непосредственно определить величину этого потенциала нельзя, так как для этого нужно опустить в раствор другой электрод, который внесет в цепь свой электродный потенциал. Таким образом, практически могут быть измерены не абсолютные величины электродных потенциалов различных электродов, а лишь разности потенциалов различных пар электродов. В электрохимии за начало отсчета принят потенциал «водородного электрода» относительно раствора с нормальной концентрацией водородных ионов (точнее с нормальной активностью $a = 1$ г-экв/л). Так как изготовить электрод из газообразного водорода не представляется возможным, поэтому практически газообразный водород адсорбируют на поверхности черненой платины, и такой электрод ведет себя как металлический водородный электрод, потенциал которого принимается условно за нуль, т. е. за начало отсчета потенциалов всех других электродов.

Значения электродных потенциалов различных веществ, отсчитанные относительно водородного электрода, не превосходят $\pm$ (2—3) В. Так, электродный потенциал калия равен $E_0 = -2{,}92$ В, цинка $E_0 = -0{,}76$ В, меди $E_0 = +0{,}34$ В и т. д.

Приведенные значения потенциалов E_0 называются нормальными потенциалами электрода, так как они измерены

при нормальной температуре (+18° С) и нормальной (1 г-моль/л) концентрации (активности) электролита.

При других температурах и концентрациях зависимость между электродным потенциалом в вольтах и концентрацией раствора определяется уравнением Нернста

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln f \cdot C, \qquad (2.33)$$

где E_0 — нормальный потенциал электрода; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8{,}317$ Дж/град; T — абсолютная температура, °К; n — валентность ионов; F — постоянная Фарадея, $F = 96\,522$ К/г-экв; C — концентрация ионов, г-экв/л; f — коэффициент активности раствора, зависящий от его концентрации.

В общем случае электролитическая ячейка может быть составлена из разных электродов, помещенных в разные растворы, как это показано на рис. 2,35,*а*. Каждая половина такого составного

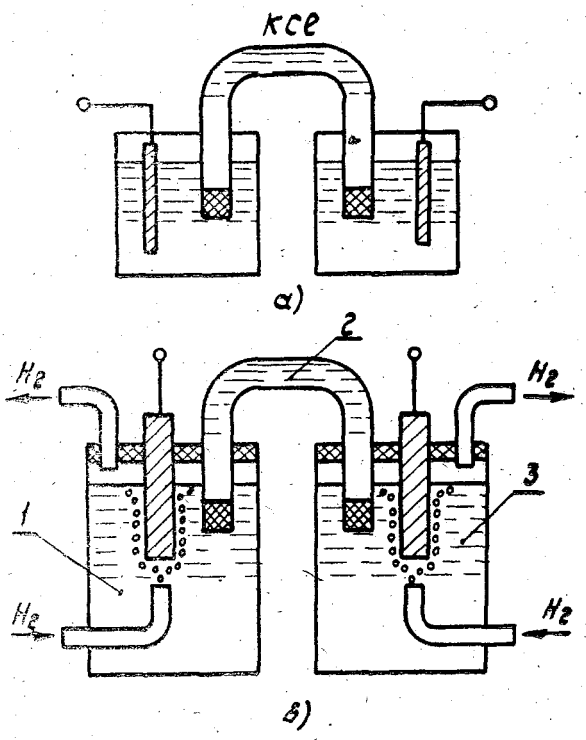


Рис. 2.35. Схемы соединения двух полуэлементов гальванического элемента с помощью электролитического ключа металлического (*а*) и «водородного» (*б*) электродов:
1 — исследуемый раствор; *2* — электролитический ключ; *3* — электролит с активностью водородных ионов, равной 1 г-экв/л.

гальванического элемента называется полуэлементом. Эдс между двумя полуэлементами в общем случае равна

$$E_{12}=E_{01}+\frac{RT_1}{n_1F}\ln f_1C_1-E_{02}-\frac{RT_2}{n_2F}\ln f_2C_2. \qquad (2.34)$$

Если же используемые электроды одинаковы и погружены в одинаковые растворы с одной и той же температурой, но отличающиеся только концентрацией, то эдс такой концентрационной цепи будет равна

$$E=\frac{RT}{nF}\ln\frac{f_1C_1}{f_2C_2}, \qquad (2.35)$$

т. е. зависит только от отношения их концентраций.

Кроме потенциалов на электродах, возникает также разность потенциалов на границе двух растворов. Такие потенциалы называются граничными. Граничный потенциал может возникнуть в результате разной подвижности ионов в растворах и, следовательно, разной скорости диффузии. Такой потенциал называется диффузионным. В зависимости от вида и концентрации соприкасающихся растворов он составляет от нескольких единиц до десятков мВ.

Для уменьшения диффузионной эдс на границе двух растворов между ними включают промежуточный концентрированный раствор с возможно близкими подвижностями катионов и анионов, например KCl или KNO_3 (электролитический ключ). На рис. 2.35,*а* показано соединение двух полуэлементов в гальваническую цепь при помощи электролитического ключа. Концы электролитического ключа закрываются полупроницаемыми пробками из ваты или асбеста.

Особенно широкое распространение гальванические преобразователи (ГП) получили для измерения активности водородных ионов, по которой можно определить состав и свойства водных растворов (pH—метры).

На рис. 2.35,*б* показан ГП, состоящий из двух водородных полуэлементов. Один из водородных электродов (измерительный) помещается в исследуемый раствор *1*, который при помощи электролитического ключа *2* соединяется с нормальным водородным полуэлементом *3*, содержащим электролит с активностью водородных ионов $a_{(H^+)}=1$ г-экв/л. Эдс между электродами полученной концентрационной цепи равна

$$E_в=\frac{RT}{F}\ln\frac{a_{(H^+)_1}}{a_{(H^+)_2}}, \qquad (2.36)$$

где $a_{(H^+)_1}$ — активность водородных ионов в исследуемом растворе; $a_{(H^+)_2}$ — активность водородных ионов в нормальном водородном полуэлементе.

Но величина $-\lg a_{(H^+)}$ называется водородным показателем и обозначается pH. Величина pH колеблется от 0 (большие концентрации кислот) до 14 (большие концентрации оснований).

Следовательно, переходя к десятичным логарифмам в последней формуле, можно получить

$$E_в = -\frac{2{,}303\,RT}{F}\,\text{pH}, \qquad (2.37)$$

т. е. эдс линейно зависит от pH.

При использовании водородного электрода в рабочем (измерительном) полуэлементе им можно измерять pH во всем диапазоне измерения (от 0 до 14). Однако вследствие неудобства измерения (необходимо непрерывно насыщать электрод водородом) водородный электрод не получил широкого распространения и используется только как образцовый электрод для лабораторных исследований.

В ГП в качестве вспомогательных полуэлементов используются каломельный, хлорсеребряный, бромсеребряный и другие полуэлементы. В качестве измерительных электродов применяются хингидронный, сурьмяный и стеклянный электроды. Последний получил наибольшее распространение.

Действие стеклянного электрода состоит в том, что ионы натрия стекла переходят в раствор, а их места занимают ионы водорода из раствора. В результате этого поверхностный слой стекла оказывается насыщенным водородными ионами, и стеклянный электрод приобретает свойства водородного электрода. Так как толщина стенок колбочки стеклянного электрода, заполненного нормальным раствором какой-либо соли или кислоты, составляет 0,05—0,1 мм, то стенки являются проводящими, хотя и имеют сопротивление от 0,5 до 200 МОм.

Основной погрешностью ГП является температурная погрешность.

§ 2.8. Полярографические преобразователи

Прохождение электрического тока через электролиты, как известно, сопровождается электролизом — выделением на одном электроде и растворением на другом определенного количества вещества. В результате этого концентрация ионов вблизи электродов оказывается отличной от концентрации в остальном растворе.

Вследствие диффузии неравные концентрации стремятся к выравниванию. Так как скорость диффузии ограничена, то разница концентраций тем больше, чем больше плотность тока на электроде. Явление поляризации заключается в изменении электродных потенциалов, вследствие изменения приэлектродной концентрации в результате протекания через электролитическую ячейку электрического тока от внешнего источника.

Рассмотрим сущность этого явления на примере пропускания тока через ячейку, состоящую из медных электродов, опущенных в нормальный раствор $CuSO_4$.

Так как каждый электрод, опущенный в раствор, получает относительно него потенциал $E_0 = +0{,}34$ В, то в исходном состоянии такая ячейка развивает эдс, равную нулю. По мере увеличения плотности тока процесс диффузии не успевает выравнивать концентрацию ионов вблизи электродов, и потенциал анода становится все более положительным (кривая *а* на рис. 2.36), а потенциал катода — все более отрицательным (кривая *к* на рис. 2.36). В результате этого внешнее напряжение, приложенное к электролити-

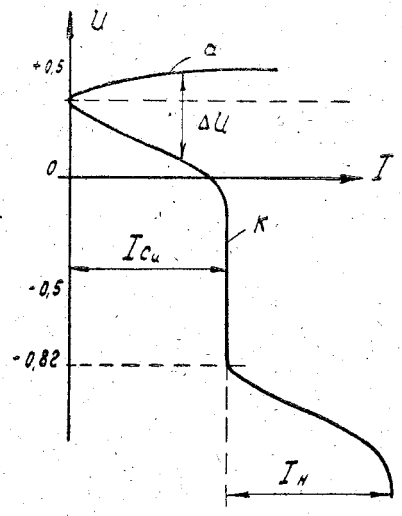


Рис. 2.36. Зависимость напряжения U поляризации от величины тока I, проходящего через электролитическую ячейку, содержащую ионы различных элементов.

ческой ячейке, должно уравновешивать, кроме падения напряжения на сопротивлении столба электролита, еще и сумму потенциалов поляризации электродов, обозначенную на рисунке ΔU.

При достижении током значения I_{Cu}, определяемого скоростью диффузии ионов меди к катоду (т. е. концентрацией электролита и его температурой), дальнейший рост тока прекратится, а катодный потенциал начнет резко понижаться. При достижении катодным потенциалом значения —0,82 В ток снова начнет возрастать примерно по тому же закону, как и на начальном участке. Это объясняется тем, что при потенциале катода относительно раствора, равном —0,82 В, помимо электролиза $CuSO_4$ начинается электролиз воды, и на катоде выделяется газообразный водород. Прирост тока I_H обусловлен тем, что в переносе зарядов начали участвовать ионы водорода. Потенциал, при котором в процессе электролиза вступает основная масса ионов данного вида, называется потенциалом выделения данного иона.

Если в растворе содержится много разных катионов, то ступенчатая кривая катодного потенциала поляризации будет содержать по ступеньке на каждый вид катионов. Потенциалы выделения для всех ионов различны. Величина же ступенек зависит от их концентраций. На этом основано использование полярографического метода для качественного и количественного анализа исследуемых растворов.

Изменяя соотношения площадей анода и катода, можно создать большую плотность тока как на катоде, так и на аноде. В последнем случае можно вести полярографический анализ не катионов, а анионов, так как ступенчатой будет кривая анодной поляризации.

Принцип действия полярографических преобразователей (ПГП) основан на использовании явления поляризации на одном из электродов электролитической ячейки при электролизе исследуемого раствора.

Так как ток, проходящий через ячейку, определяется выражением

$$I = \frac{U - (e_а - e_к)}{R}, \qquad (2.38)$$

где R — сопротивление ячейки; $e_а$ — потенциал анода; $e_к$ — потенциал катода; U — напряжение, приложенное к ячейке, то, чтобы падение напряжения $IR_в$ электролите не вносило погрешности в определение потенциалов, испытуемый раствор должен иметь большую проводимость. Для увеличения проводимости добавляют в раствор индифферентные электролиты (фоны), не вступающие в реакцию с испытуемым раствором. Хорошими фонами являются хлориды, хлораты и сульфаты лития и кальция. ГПГ могут быть с большим успехом использованы в гидрометрии для химического анализа растворенных веществ.

Для воспроизводимости рассмотренных полярографических кривых необходимо, чтобы поляризующий электрод обладал однородной и непрерывно обновляющейся поверхностью, обеспечивающей стационарность процесса диффузии ионов к электроду. Лучше всего этим требованиям удовлетворяет преобразователь с обновляющимся капающим ртутным электродом (рис. 2.37).

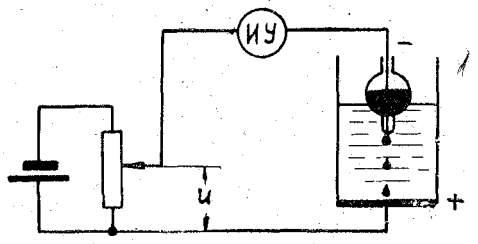


Рис. 2.37. Полярографический преобразователь с капающим ртутным электродом.

Ртутный электрод обладает рядом недостатков (ядовитость ртути, невозможность исследования расплавленных солей, окисление ртути при напряжениях больших 0,4 В), поэтому используют ПГП с твердыми электродами, чаще всего с электродами из платины, золота, серебра, никеля, или с электродами, покрытыми слоем амальгамы ртути.

§ 2.9. Химотронные (солионные) преобразователи

Химотронные преобразователи (ХП) представляют собой ячейку, заполненную раствором, содержащим как окисленные, так и восстановленные формы определенного иона.

В качестве электродов, к которым прикладывается внешнее напряжение, используется металл, который химически пассивен к электролиту (платина, золото). Электролитом в ХП чаще всего является водный раствор KJ, в котором растворяется небольшое количество иода.

Иодистый калий, диссоциируя в воде, создает катионы калия K^+ и анионы иода J^-. Внешнее напряжение на химотронном преобразователе обычно не превышает 1 В, поэтому катионы K^+ в переносе зарядов не участвуют (для этого необходимо, чтобы катод имел потенциал —2 В). Носителями зарядов являются только ионы J^-. Растворенный же иод в присутствии ионов J^- может существовать в растворе только в виде трехиодных ионов J_3^-. Если к зарядам такой ячейки приложить внешнее напряжение, то иодные анионы J^- будут двигаться к аноду и отдавать ему свои электроны

$$3J^- \rightarrow J_3^- + 2e. \qquad (2.39)$$

В результате прохождения тока концентрация ионов J^- в растворе непрерывно уменьшается, через короткое время все ионы J^- оказываются израсходованными, и проводимость упадет почти до нуля.

Проводимость раствора могла бы быть восстановлена, если бы к катоду каким-либо способом могли быть доставлены трехиодные ионы J_3^-. Тогда на катоде могла бы идти реакция восстановления

$$J_3^- + 2e \rightarrow 3J^-. \qquad (2.40)$$

Однако самостоятельно двигаться к катоду против электрического поля отрицательные ионы J_3^- не могут. Если в область катода механически впрыснуть электролит с ионами J_3^-, то через преобразователь пойдет импульс тока, соответствующий количеству впрыснутого электролита.

На этом принципе создаются измерительные ХП для измерения различных механических величин: переменных давлений, перемещений, скоростей и ускорений, а также для усиления и интегрирования электрических и гидравлических сигналов.

Г. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электронные преобразователи включают в себя преобразователи с автоэлектронной эмиссией (с холодным катодом), термоэлектронной эмиссией (с горячим катодом) и фотоэлектронной эмиссией (фотоэлементы).

Поскольку преобразователи с автоэлектронной эмиссией используются, главным образом, для измерения вакуума, то они не рассматриваются.

Из преобразователей с термоэлектронной эмиссией рассматривается только лампа с механическим управлением электродов (механотрон), которая находит применение в гидрометрических приборах.

§ 2.10. Преобразователь с термоэлектронной эмиссией

Преобразователь с термоэлектронной эмиссией и механическим управлением электродов (механотрон) выполняется в виде вакуумной лампы, ток эмиссии и напряжение между электродами которой поддерживаются постоянными. Тогда электронный ток является функцией только расстояния между электродами.

Чувствительность к перемещению по току

$$S_I = \frac{\Delta I_a}{\Delta l} = \frac{2ASU_a^{3/2}}{l^3} \simeq 100 \text{ мкА/мкм}, \qquad (2.41)$$

где A — постоянная, равная $2{,}34 \cdot 10^{-5}$; S — рабочая поверхность катода, мм^2; $U_а$ — напряжение между анодом и катодом, В; l — расстояние между электродами, мм.

Чаще используются двуханодные (дифференциальные) преобразователи с подвижным катодом (преобразователь с зондовым уравнением), а также трехэлектродные (триодные) преобразователи.

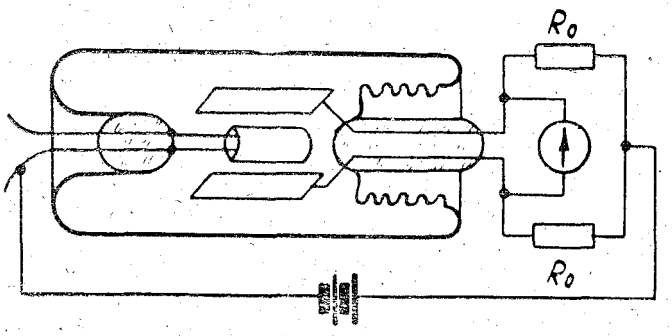


Рис. 2.38. Двуханодный преобразователь с термоэлектронной эмиссией и механическим управляемым катодом и схема его включения в измерительную цепь.

На рис. 2.38 изображен двуханодный преобразователь и схема его включения.

§ 2.11. Преобразователи с фотоэлектронной эмиссией

Преобразователи с фотоэлектронной эмиссией (фотоэлементы) делятся на следующие группы: фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления) и вентильные фотоэлементы.

Основными характеристиками фотоэлементов являются:

1) световая характеристика — зависимость фототока $I_Ф$ от интенсивности светового потока Ф (или освещенности E), эта зависимость характеризует интегральную чувствительность фотоэлемента S,

$$S = \frac{\Delta I_Ф}{\Delta Ф} \text{ мкА/лм или } S = \frac{\Delta I_Ф}{\Delta E} \text{ мкА/люкс;}$$

2) спектральная характеристика — зависимость чувствительности S от длины волны $\lambda_Ф$ падающих лучей, $S = f_1(\lambda_Ф)$;

3) частотная характеристика — зависимость чувствительности S от частоты f изменения светового потока, $S = f_2(f)$ — инерционность фотоэлемента;

4) вольтамперная характеристика — зависимость фототока от величины напряжения, приложенного к фотоэлементу $I_Ф = f_3(U)$.

а. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом (ВФЭ) представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу, фоточувствительный катод которой испускает электроны под действием светового потока (рис. 2.39).

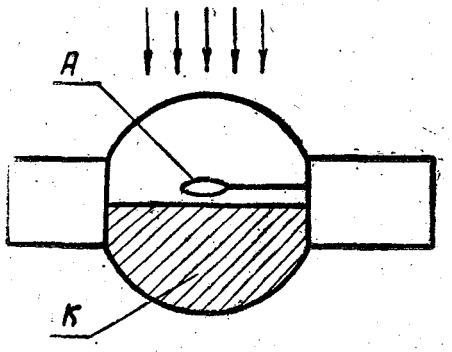


Рис. 2.39. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом:
A — анод; *K* — катод.

Фототок вакуумных элементов пропорционален интенсивности светового потока, а их чувствительность составляет 20—100 $\frac{мкА}{лм}$. Для увеличения чувствительности внутрь баллона вводится небольшое количество инертного газа. Первичные электроны, выбитые фотонами света с фотокатода, при своем движении к аноду ионизируют нейтральные молекулы газа, в результате чего общий световой ток увеличивается. Чувствительность газовых фотоэлементов составляет 100—250 $\frac{мкА}{лм}$, однако нарушается линейность зависимости $I_Ф = f(Ф)$.

Чтобы все электроны, вылетающие из катода, достигали анода, между электродами должно быть приложено достаточно большое напряжение (более 30—70 В). Вакуумные фотоэлементы являются практически безынерционными преобразователями. Газовые фотоэлементы обладают инерцией, поскольку процессы ионизации и деионизации газа длятся около 10^{-4} с.

Фотокатоды, как правило, чувствительны к определенному диапазону длин волн, поэтому спектральные характеристики имеют

один (редко два) ярко выраженный максимум (рис. 2.40). Спектральные характеристики могут корректироваться соответствующими светофильтрами.

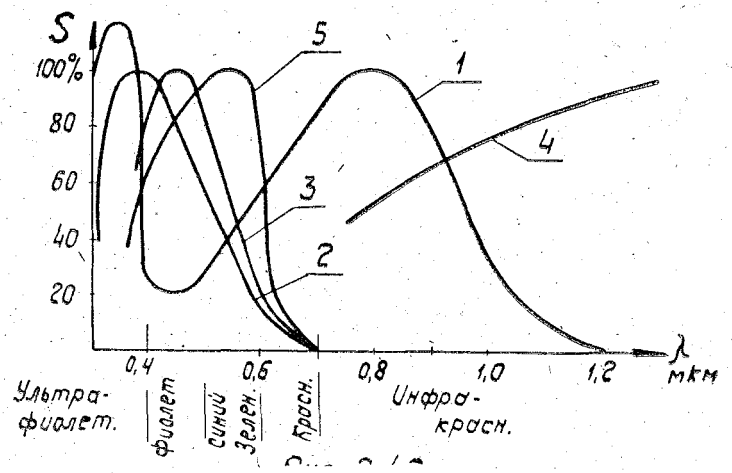


Рис. 2.40. Спектральные характеристики кислородно-цезиевого (*1*) и сурьмяно-цезиевого (*2*) фотоэлементов, сернисто-кадмиевого (*3*) и сернисто-свинцового (*4*) фотосопротивлений, а также селенового (*5*) фотогенератора.

Чувствительность преобразователей с ВФЭ зависит от температуры, освещенности («утомляемость») и времени («старение»).

Особую разновидность преобразователей с ВФЭ представляют фотоумножители, в которых используется принцип многократного усиления фототока с помощью вторичной эмиссии электронов эмиттерами, расположенными в самом умножителе. Коэффициент умножения достигает десятков и сотен тысяч, а интегральная чувствительность — несколько ампер на люмен.

б) Внутренний фотоэффект заключается в изменении сопротивления некоторых полупроводников под действием светового потока. Такие фотоэлементы называются фотосопротивлениями (ФС) (рис. 2.41).

Зависимость фототока от светового потока имеет нелинейный характер и зависит от напряжения, приложенного к фотосопротивлению. Чувствительность измеряется в $\frac{\text{мкА}}{\text{лм}\cdot\text{В}}$. Иногда удобнее знать относительное изменение сопротивления $\frac{\Delta R}{R_т}$, где $R_т$ — темновое сопротивление.

Инерционные свойства выражены у ФС больше, чем у газовых фотоэлементов с ВФЭ. Постоянная времени ФС составляет 1—20 мс.

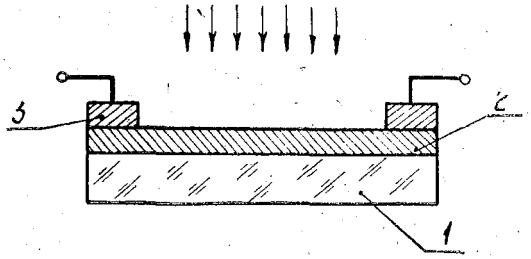


Рис. 2.41. Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фотосопротивление): *1* — стеклянная подложка; *2* — полупроводниковый слой; *3* — контакты.

Характеристики ФС резко зависят от температуры, освещенности и времени. На рис. 2.42 показаны частотные характеристики некоторых типов ВФЭ и ФС.

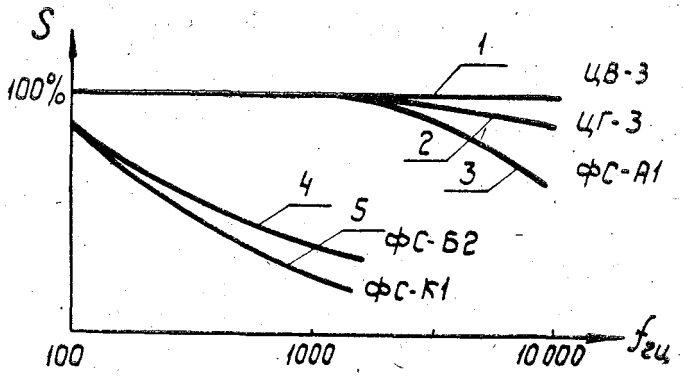


Рис. 2.42. Частотные характеристики фотоэлектрических преобразователей с внутренним и внешним фотоэффектом:
1 — вакуумный и *2* — ионный фотоэлементы; *3*, *4* и *5* — различные типы фотосопротивлений.

в) Вентильные фотоэлементы основаны на явлении фотоэффекта, заключающегося в том, что запорный слой некоторых полупроводниковых переходов под действием света становится источником тока. Цепь с таким фотоэлементом не нуждается в дополнительном источнике питания, что является основным достоинством этих фотоэлементов. Чувствительность может быть повышена, если приложить дополнительное напряжение от внешнего источника эдс к фотоэлементу. У фотодиодов (ФД) и ФДК (кремниевый) интегральная чувствительность достигает величины $3 \cdot 10^4 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$.

Наряду с фотодиодами промышленность выпускает фототриоды, которые позволяют подавать управляющий электрический сигнал на один из электродов, что расширяет возможности использования фотоэлемента. Вентильные фотоэлементы более инерционны, нежели фотосопротивления.

Фотоэлектрические преобразователи (ФП) применяются для измерения различных неэлектрических величин и весьма разнообразны в отношении конструкции и схемы оптического устройства, определяющего воздействие светового потока на фотоэлемент. По принципу использования ФП можно разделить на две группы.

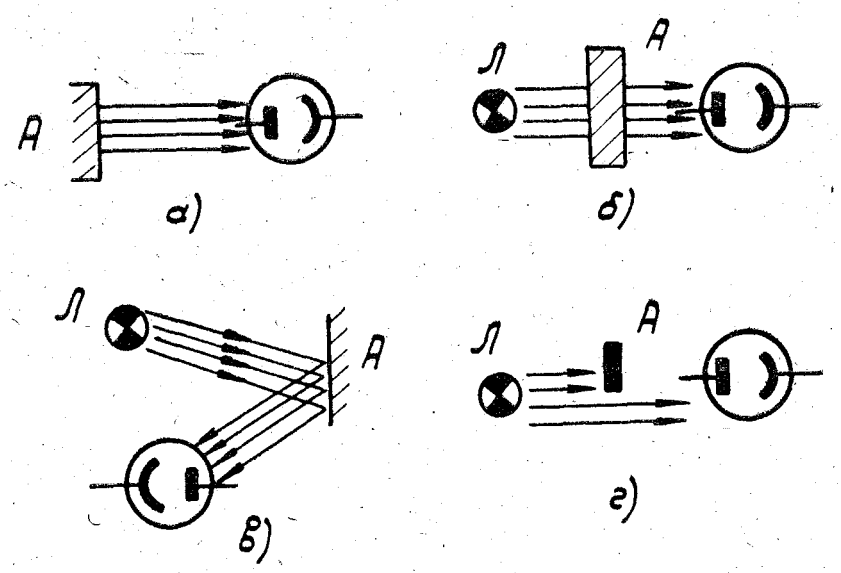


Рис. 2.43. Схемы использования фотоэлектрических преобразователей для измерения яркости (*а*), прозрачности (*б*), состояния поверхности (*в*) и перемещения (*г*) измеряемого объекта *А*

К первой группе относятся ФП, работающие в режиме «амплитудной модуляции». Фототок в них определяется световым потоком, зависящим в свою очередь от измеряемой физической величины. По этому методу могут работать только вакуумные фотоэлементы (реже газовые), обладающие более стабильными характеристиками, причем и в этом случае приходится применять различные меры, снижающие вредное воздействие внешних факторов (температура, старение, нестабильность источников света и питания).

На рисунке 2.43 изображены различные схемы использования ФП, работающих по этому методу.

Ко второй группе относятся ФП, работающие в режиме «временной или частотной модуляции» (см. гл. III), когда функцией измеряемой величины является не величина фототока, а лишь наличие фототока, который может быть уверенно обнаружен на фоне помех. При таком методе использования ФП резко снижаются требования к их стабильности.

Д. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

К ионизационным преобразователям (ИП) относят большую группу преобразователей, в которых измеряемая неэлектрическая величина функционально связана с током ионной проводимости газа, возникающим под действием излучения радиоактивных веществ или рентгеновских лучей.

Для любого ИП характерным является наличие источника *1* и приемника *2* излучений (рис. 2.44).

В измерительных приборах используются различные виды ядерных излучений (α, β, γ и нейтронное излучение). Источниками ядерных излучений служат естественные и искусственные радиоактивные изотопы.

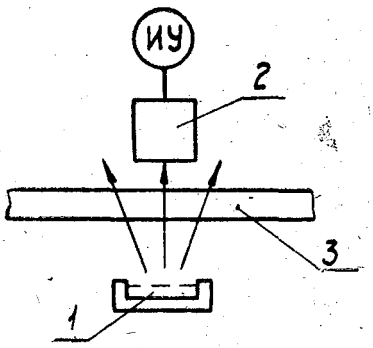


Рис. 2.44. Ионизационный преобразователь:
1 — источник излучения; *2* — приемник излучения; *3* — объект измерения.

Основными понятиями, характеризующими ядерные излучения, являются:

1) активность источника $A\left(\frac{\text{распад}}{\text{с}}\right)$ — число актов распада, происходящих в источнике в одну секунду; единица активности 1 кюри соответствует $37 \cdot 10^{10}$ актов распада в секунду;

2) интенсивность излучения I (Вт/м^2) — количество энергии, проходящее через единицу поверхности, перпендикулярной направлению падающих лучей, в единицу времени;

3) доза облучения — ионизационная способность излучения; доза в 1 рентген образует $2{,}08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см^3 воздуха при давлении 760 мм рт. столба.

Радиоактивные изотопы характеризуются видом испускаемых частиц, их энергией и периодом полураспада.

Приемники ионизирующих излучений основаны или на явлении ионизации газов при прохождении через них ядерного излучения или люминесценции некоторых веществ (фосфоров) под действием ядерного излучения.

Обычно используются ионизационные камеры, газоразрядные счетчики и сцинтилляционные счетчики.

Наибольшее распространение в гидрометрии получили газоразрядные счетчики (счетные трубки).

В этих счетчиках используется усиление первичного ионизационного тока путем ионизации нейтральных молекул газа до образования самостоятельного газового разряда. Такая трубка работает как спусковое устройство, благодаря чему удается регистрировать каждую пару ионов, образованную в трубке.

На рис. 2.45 изображена счетная трубка. Стенки изготавливаются из стекла или металла. Внутри они заполняются аргоном, азотом или другими инертными газами. В самогасящихся счетчиках для гашения разряда в газ, заполняющий счетчик, вводятся специальные примеси с многоатомными молекулами. В несамогасящихся счетчиках (Гейгера—Мюллера) гашение производится спе-

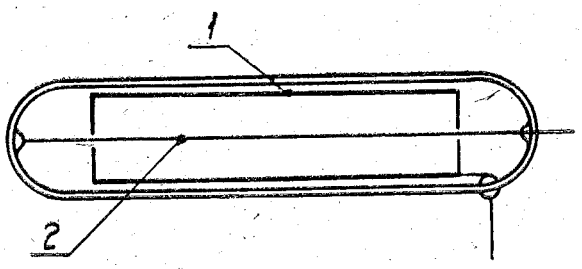


Рис. 2.45. Счетная трубка:
1 — катод; *2* — анод.

циальной схемой (рис. 2.46). В исходном состоянии лампа $Л$ заперта отрицательным напряжением на ее сетке. Напряжение на счетной трубке равно напряжению A источника питания. При возникновении разряда в трубке ток, текущий по сопротивлению R_c,

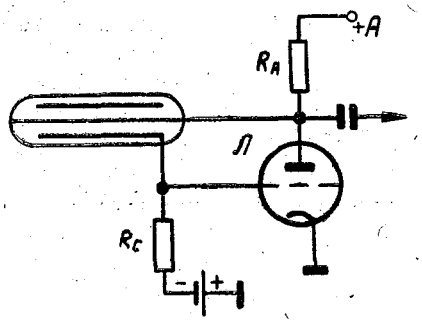


Рис. 2.46. Схема гашения несамогасящейся счетной трубки.

уменьшает отрицательное напряжение на сетке лампы и открывает ее. Ток анода создает значительное падение напряжения на сопротивлении R_A, в результате чего напряжение на аноде трубки уменьшается, и она гаснет.

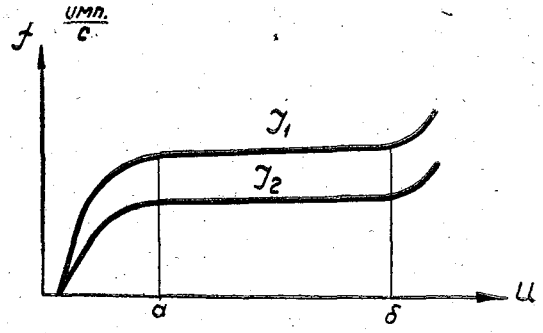


Рис. 2.47. Характеристика счетной трубки при разных значениях интенсивности J облучения.

Длительность импульсов не превышает 10^{-4}—10^{-5} с, а «мертвое время» (время, в течение которого счетчик восстанавливается после разряда) не превышает 10^{-4} с.

Основной рабочей характеристикой трубок является их счетная характеристика — зависимость частоты f импульсов от напряжения U при постоянной интенсивности облучения J (рис. 2.47).

У хороших счетчиков «плато» (участок *аб*) имеет длину 60—100 В и наклон 0,125% на 1 В.

В измерительных приборах применяют два режима: 1) режим среднего тока (интегрирование импульсов) и 2) счетный режим.

К погрешностям таких приборов относятся:

1) распад радиоактивного вещества и нестабильность источника во времени;

2) статистический (неравномерный) характер излучения.

В гидрометрии ионизационные преобразователи используются очень широко для измерения различных гидрометрических величин: определения запаса воды в снеге, влажности грунтов, измерения скорости течения воды в заросших руслах, скоростей талых и грунтовых вод.

Глава III

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 3.1. Структура приборов, построенных по методу прямого преобразования

Структурная схема прибора, построенного по методу прямого преобразования (прямого действия), характеризуется последовательным соединением всех измерительных преобразователей, входящих в прибор и образующих его отдельные конструктивные узлы (рис. 3.1).

Рис. 3.1. Структурная схема прибора, построенного по методу прямого преобразования: S_1, S_2, . . ., S_n — чувствительности отдельных измерительных преобразователей, входящих в измерительный прибор.

При таком построении прибора все измерительные преобразователи являются равноправными и свойства каждого из них (чувствительность, погрешности и т. п.) в одинаковой степени влияют на свойства всего прибора независимо от места, которое они занимают в общей цепи преобразования.

Чувствительность прибора равна произведению чувствительностей всех измерительных преобразователей

$$S_{\text{приб}} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \ . \ . \ . \ S_n, \qquad (3.1)$$

а погрешность прибора находится по определенным правилам.

§ 3.2. Суммирование погрешностей

Результирующая погрешность измерительного прибора складывается из большого числа отдельных составляющих. Каждая из составляющих может быть найдена расчетным или экспериментальным путем, а суммирование их должно быть произведено с учетом действительных законов распределения всех составляющих и корреляционных связей между ними.

Теория вероятностей для дисперсии суммы двух случайных величин, как известно, дает следующее выражение:

$$\sigma_\Sigma^2=\sigma_1^2+2r\,\sigma_1\sigma_2+\sigma_2^2, \tag{3.2}$$

где σ_1^2 и σ_2^2 — дисперсии случайных величин; σ_Σ^2 — дисперсия суммы двух случайных величин; r — коэффициент корреляции этих величин, $-1 \leqslant r \leqslant 1$.

В частном случае, когда составляющие независимы между собой ($r = 0$), суммирование погрешностей производится геометрически, т. е. как корень квадратный из суммы квадратов составляющих

$$\sigma_\Sigma=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2}. \tag{3.3}$$

Составляющие погрешности, имеющие жесткую корреляционную связь между собой ($r = \pm 1$), должны складываться алгебраически, т. е. с учетом их знаков

$$\sigma_\Sigma=\sigma_1\pm\sigma_2. \tag{3.4}$$

Исходя из этого, для суммирования всех погрешностей прежде всего надо выделить группы погрешностей, сильно коррелированных между собой. Вследствие жесткой взаимной корреляции и общей причины, вызывающей все эти погрешности, они будут распределены по одному и тому же закону, и форма результирующего закона распределения будет также соответствовать этому закону. Поэтому внутри каждой из этих групп погрешности должны складываться алгебраически.

Результирующие погрешности, полученные после суммирования в каждой из групп, уже не имеют между собой заметных корреляционных связей и должны рассматриваться как статистически независимые, и сложение их должно производиться геометрически.

Суммирование максимальных абсолютных значений всех составляющих погрешности (арифметическое суммирование), основанное на невероятном предположении о том, что все многочисленные погрешности имеют одновременно одинаковый знак и максимальное значение, неправомерно и не подкрепляется практикой.

Уменьшение погрешности всего прибора может быть достигнуто либо уменьшением погрешности каждого звена, либо таким вы-

бором звеньев, при котором имеет место взаимная коррекция погрешностей отдельных звеньев. Эффективной мерой является применение дифференциальных преобразователей.

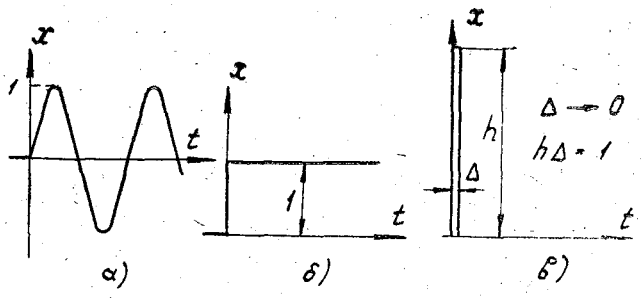
Приборы прямого преобразования являются наименее точными (0,5—2%), но наиболее простыми приборами для измерения неэлектрических величин.

§ 3.3. Динамические погрешности измерительных устройств

Динамические погрешности приборов однозначно определяются их динамическими свойствами. Для описания динамических свойств необходимо установить характер изменения выходной величины от времени при заданном характере входной величины.

Наиболее часто изменение во времени входной величины x задается или в виде синусоидальной, или ступенчатой, или единичной импульсной (толчкообразной) функции времени t (рис. 3.2). Единичная импульсная функция (δ-функция) обладает следующим свойством: если длительность импульса $\Delta \to 0$, то амплитуда импульса $h \to \infty$, но их произведение $h\Delta = 1$.

Связь между входной и выходной величинами в функции времени выражается при помощи дифференциальных уравнений.



Рисч 3.2. Типовые изменения во времени входной величины: синусоидальное (*а*), ступенчатое (*б*) и точкообразное (*в*).

Основой получения правильного дифференциального уравнения является правильное представление о физических процессах, протекающих в отдельных измерительных преобразователях, и правильное их математическое отображение.

Часто оказывается, что различные по своей физической природе измерительные преобразователи описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями, т. е. обладают одинаковыми динамическими свойствами.

При исследовании динамических свойств измерительных устройств, их удобно делить на отдельные элементы не по физической

природе, а по их динамическим свойствам. Это обстоятельство приводит к понятию «динамического звена». Каждое динамическое звено характеризуется своим дифференциальным уравнением, описывающим его поведение в динамическом режиме.

Введение понятия динамического звена удобно еще и потому, что для линейных систем (систем, описываемых линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами) любой сколь-угодно сложный датчик или прибор может быть представлен в виде комбинации небольшого числа типовых динамических звеньев.

Условимся в дальнейшем обозначать входную величину с соответствующим коэффициентом в правой части уравнения, а выходную величину — в левой. Таким образом, правая часть уравнения показывает, какие величины подаются на вход звена, и с каким усилением эта величина передается на выход. Левая часть уравнения показывает, как реагирует звено на входное воздействие, т. е. будет давать закон, по которому протекает динамический процесс.

Рассмотрим некоторые типовые динамические звенья.

а. Безынерционное усилительное звено. Безынерционным усилительным звеном называется звено, у которого выходная величина в любой момент времени пропорциональна входной

$$y = S \cdot x, \tag{3.5}$$

где S — чувствительность, коэффициент усиления, коэффициент передачи или передаточное число звена.

Примерами этих звеньев являются электронная усилительная лампа, вакуумный фотоэлемент, тензосопротивление, реостатный преобразователь и др.

Очевидно, что у такого звена динамические погрешности отсутствуют, поскольку в любой момент времени выходная величина воспроизводит входную величину (в некотором масштабе).

б. Апериодическое звено первого порядка. Это звено описывается дифференциальным уравнением вида

$$T\frac{dy}{dt} + y = S \cdot x, \tag{3.6}$$

где T — постоянная времени звена, с.

Примерами таких звеньев являются термосопротивления, термопары, фотосопротивления, газовые фотоэлементы и др.

Если входная величина x представляет ступенчатую функцию (рис. 3.2,*б*), то выходная величина изменяется во времени по закону

$$y = S \cdot x \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \tag{3.7}$$

Если $t = T$, то $e^{-1} = 0{,}368$, а $1 - e^{-1} = 0{,}632$. Следовательно, постоянная времени T численно равна тому времени t, при котором выходная величина достигает 63,2% от своего установившегося значения при ступенчатом входном воздействии и нулевых начальных условиях.

На рис. 3.3 представлено графическое изображение этой зависимости при различных постоянных времени T.

При $t > 5T$ величина $e^{-\frac{t}{T}}$ становится меньше 0,01 и зависимость между y и x имеет вид

$$y = S \cdot x. \tag{3.8}$$

Следовательно, выходная величина воспроизводит входную величину лишь через некоторое время, зависящее от величины постоянной времени T апериодического звена.

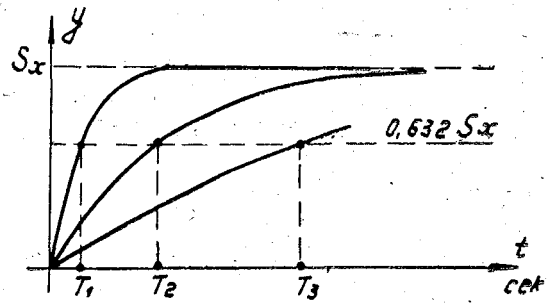


Рис. 3.3. Зависимость от времени выходной величины апериодического звена первого порядка при ступенчатом входном воздействии и различных постоянных времени T.

Величину $S \cdot x$ можно рассматривать как установившееся значение выходной величины y при $t \to \infty$.

Если входная величина x непрерывно изменяется во времени, то выходная величина y воспроизводит ее с ошибкой, зависящей от скорости изменения входной величины и постоянной времени T.

Если входная величина изменяется по синусоидальному закону

$$x = x_m \sin \omega t, \tag{3.9}$$

где x_m — амплитуда, а ω — частота изменения входной величины, то выходная величина в установившемся режиме будет изменяться по закону

$$y = \frac{S \cdot x_m}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \psi), \tag{3.10}$$

где $\psi = \operatorname{arctg} \omega T$, т. е. также будет изменяться по синусоидальному закону с той же частотой, но с амплитудой и фазой, зависящей от частоты.

При $\omega = 0$ амплитуда выходной величины $y_m = Sx_m$, а начальная фаза $\psi = 0$.

При увеличении ω $y_m \to 0$, а $\psi \to \frac{\pi}{2}$. Множитель $M = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$ определяет амплитудные динамические погрешности, а фаза ψ — фазовые погрешности.

На рис. 3.4 представлены зависимости M и ψ от ωT.

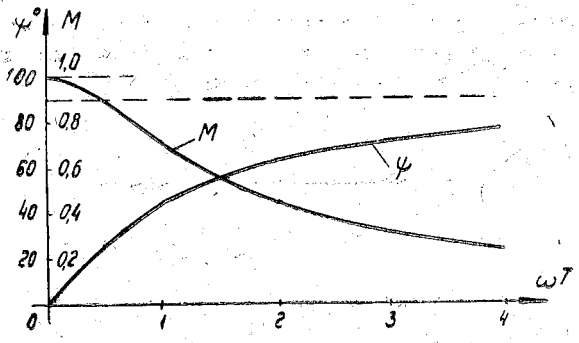


Рис. 3.4. Амплитудная M и фазовая ψ характеристики апериодического звена первого порядка.

Величина $1 - M$ равна динамической погрешности. Если

$$T < \frac{1}{3\omega_{max}} \simeq \frac{1}{20 f_{max}} = \frac{1}{20} T_{min}, \tag{3.11}$$

то динамическая погрешность не превосходит 5%.

Следовательно, апериодическое звено с постоянной времени, малой по сравнению с периодом колебаний входной величины, ведет себя как безынерционное звено.

Если входная величина изменяется по закону

$$x = \dot{x}_0 t, \tag{3.12}$$

где $\dot{x}_0$ — постоянная скорость изменения входной величины, то выходная величина равна

$$y = Sx_0 t - S\dot{x}_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) T. \tag{3.13}$$

В установившемся режиме абсолютная ошибка $\Delta y = -S\dot{x}_0 T$, т. е. пропорциональна постоянной времени T и скорости изменения входной величины $\dot{x}_0$. Знак ее обратен знаку $\dot{x}_0$ (рис. 3.5).

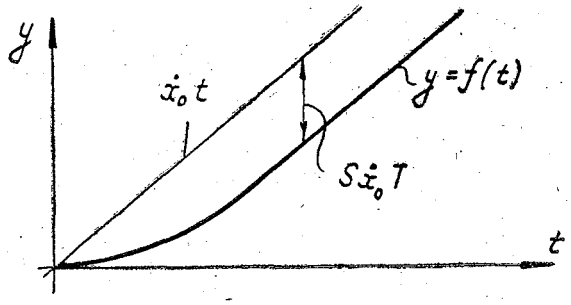


Рис. 3.5. Зависимость выходной величины y от времени t при постоянной скорости $\dot{x}_0$ изменения входной величины.

в. Динамическое звено второго порядка. Дифференциальное уравнение этого звена имеет вид

$$T_1^2 \frac{d^2y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y = Sx, \tag{3.14}$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени, с.

В зависимости от значения корней характеристического уравнения

$$T_1^2\lambda^2 + T_2\lambda + 1 = 0 \tag{3.15}$$

поведение динамического звена различно.

Если корни вещественные отрицательные

$$\lambda_1 = -p_1 \text{ и } \lambda_2 = -p_2, \tag{3.16}$$

что имеет место при $T_2 > 2T_1$, то при ступенчатом входном воздействии выходная величина изменяется по закону

$$y = Sx\left(1 - \frac{p_2}{p_1 - p_2} e^{-p_1 t} + \frac{p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}\right). \tag{3.17}$$

Такое звено называется апериодическим звеном второго порядка. Можно показать, что такое звено может быть заменено двумя последовательно соединенными звеньями первого порядка.

Если $T_2 < 2T_1$, то корни комплексные сопряженные

$$\lambda_1 = -p + jq \text{ и } \lambda_2 = -p - jq. \qquad (3.18)$$

Такое звено называется колебательным звеном второго порядка. Примерами таких звеньев являются преобразователи, обладающие массой, упругостью и вязким трением; двигатель постоянного тока с независимым возбуждением и др.

При ступенчатом изменении входной величины выходная величина изменяется по закону

$$y = Sx\left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\left(\omega_0 t\sqrt{1-\beta^2} + \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}\right)\right], \qquad (3.19)$$

где $\beta = \frac{T_2}{2T_1}$ — степень успокоения; $\omega_0 = \frac{1}{T_1}$ — частота собственных колебаний $\frac{1}{\text{с}}$.

Графическое изображение этой зависимости дано на рис. 3.6.

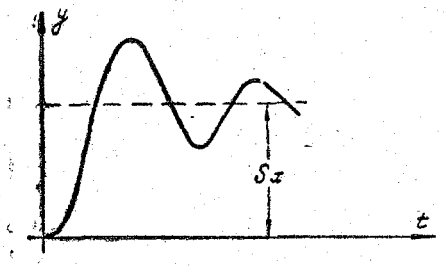


Рис. 3.6. Зависимость от времени выходной величины y колебательного звена второго порядка при ступенчатом входном воздействии.

Величины ω_0 и β для механических систем могут быть найдены по формулам

$$\omega_0^2 = \frac{g}{\delta_{\text{ст}}}, \qquad (3.20)$$

где g — ускорение силы тяжести 9,81 м/с²; $\delta_{\text{ст}}$ — статический прогиб (деформация упругого элемента под действием силы тяжести инерционной массы), м, а

$$\beta = \frac{\ln\frac{a_1}{a_2}}{\sqrt{\left(\ln\frac{a_1}{a_2}\right)^2 + \pi^2}}, \qquad (3.21)$$

где a_1 и a_2 — амплитуды свободных колебаний, следующих друг за другом.

Для $\beta = 0{,}6 \div 0{,}7$ величина a_2 должна составлять $(0{,}1 \div 0{,}05)a_1$

Если входная величина изменяется по закону

$$x = x_m \sin \omega t, \tag{3.22}$$

то выходная величина в установившемся режиме будет следовать уравнению

$$y = \frac{S \cdot x_m}{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 + 4\beta^2\lambda^2}} \sin\left(\omega t - \operatorname{arctg}\frac{2\beta\lambda}{\lambda^2 - 1}\right), \tag{3.23}$$

где $\lambda = \frac{\omega}{\omega_0}$ — отношение угловой скорости вынужденных колебаний ω к частоте собственных колебаний ω_0.

И в этом случае выходная величина также изменяется по гармоническому закону с той же частотой, что и входная величина, но с амплитудой и фазой, зависящими от частоты ω.

Множитель

$$M = \frac{1}{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 + 4\beta^2\lambda^2}} \tag{3.24}$$

определяет амплитудные динамические погрешности.

Семейство кривых $M = f(\lambda)$ при различных β представлено на рис. 3.7.

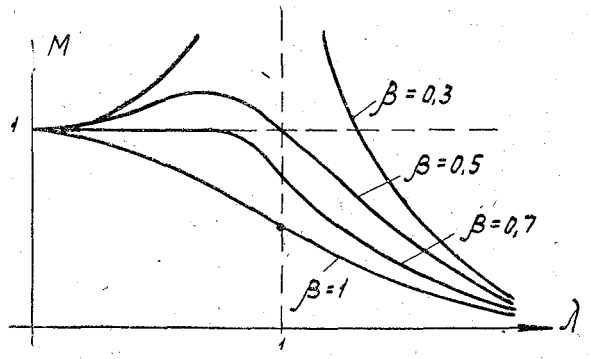


Рис. 3.7. Зависимость относительного изменения M выходной величины y колебательного звена второго порядка от относительного изменения λ частоты входной величины при различных величинах степени успокоения β.

Динамические погрешности не превосходят нескольких процентов, если $\lambda = 0{,}2 \div 0{,}25$, а β лежит в пределах 0,6—0,7.

Это требование должно выполняться для любого измерительного устройства.

г. Интегрирующее (астатическое) звено выражается уравнением

$$\frac{dy}{dt} = S \cdot x. \tag{3.25}$$

Отсюда следует, что

$$y = S \int_0^t x dt. \tag{3.26}$$

Примерами астатического звена являются двигатель постоянного тока, гироскопы и др.

Если входная величина представляет ступенчатую функцию, то выходная величина изменяется по закону

$$y = S \cdot x \cdot t. \tag{3.27}$$

д. Дифференцирующее звено описывается уравнением

$$y = S \frac{dx}{dt}. \tag{3.28}$$

Примерами дифференцирующих звеньев являются индукционный и пьезоэлектрический измерительные преобразователи, генератор постоянного тока и др.

Если входная величина представляет собой линейную функцию времени

$$x = \dot{x}_0 t, \tag{3.29}$$

где $\dot{x}_0$ — постоянная скорость изменения входной величины, то выходная величина дифференцирующего звена будет постоянной величиной

$$y = S\dot{x}_0 = \text{const}. \tag{3.30}$$

§ 3.4. Мостовые измерительные цепи электрических приборов для измерения неэлектрических величин

Так как угол отклонения большинства типов указателей пропорционален току или напряжению, т. е. пропорционален $\sqrt{P_{\text{ук}}}$, где $P_{\text{ук}}$ — мощность, подводимая к указателю, то для достижения максимальной чувствительности необходимо обеспечить наибольшую эффективность преобразования каждым преобразователем

прибора, что зависит не только от свойств самих преобразователей, но и от соответствующего их согласования.

В общем случае цепь прибора с генераторным преобразователем может быть представлена эквивалентной схемой (рис. 3.8), где Z_i — внутреннее (выходное) сопротивление преобразователя, а $Z_{ук}$ — внешнее (входное) сопротивление цепи указателя (нагрузки).

К подобной эквивалентной схеме можно привести любую измерительную цепь, если использовать теорему об эквивалентном генераторе.

Для получения указателем максимальной мощности имеется оптимальное соотношение между $Z_{ук}$ и Z_i, а именно

$$Z_{ук}=Z_i^*, \tag{3.31}$$

где Z_i^* — сопротивление, комплексно сопряженное Z_i.

Практически достаточно выполнения условия

$$|Z_{ук}|=|Z_i|.$$

В электрических приборах для измерения неэлектрических величин широко используются как равновесные, так и неравновесные мостовые цепи.

Схема одинарного моста переменного тока показана на рис. 3.9.

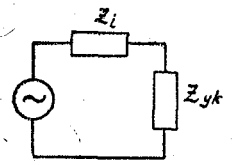


Рис. 3.8. Эквивалентная схема измерительной цепи с генераторным преобразователем.

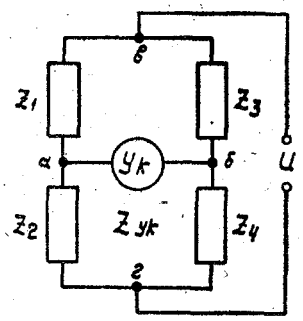


Рис. 3.9. Схема одинарного измерительного моста переменного тока.

Выражение для тока $\dot{I}_{ук}$ при заданных значениях напряжения $\dot{U}$ и сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 плеч моста имеет вид

$$\dot{I}_{ук}=\dot{U}\frac{\dot{Z}_1\cdot\dot{Z}_4-\dot{Z}_2\cdot\dot{Z}_3}{\dot{Z}_{ук}(\dot{Z}_1+\dot{Z}_2)(\dot{Z}_3+\dot{Z}_4)+\dot{Z}_1\dot{Z}_2(\dot{Z}_3+\dot{Z}_4)+\dot{Z}_3\dot{Z}_4(\dot{Z}_1+\dot{Z}_2)}, \tag{3.32}$$

где $\dot{Z}_{ук}$ — сопротивление цепи указателя.

Как видно из этого выражения, чувствительность пропорциональна напряжению источника питания $\dot{U}$ и зависит от соотношения сопротивлений плеч, а также от числа активных (рабочих) плеч.

Если рабочие плечи имеют приращения сопротивлений одного знака, то они располагаются в противоположных плечах, а если разных — то в соседних. Последний случай соответствует применению дифференциальных преобразователей. Для них обычно $Z_1 = Z_2$ и условие равновесия имеет место при $Z_3 = Z_4$.

В случае активных плеч максимальная мощность, передаваемая указателю, имеет место при $R_3 = R_4 \ll R_1 = R_2$ и $R_у^к = \frac{R_1}{2}$. Мощность в указателе при этом равна

$$P_{ук} = \frac{P}{8} \varepsilon_1^2, \tag{3.33}$$

где P — мощность, рассеиваемая преобразователем;

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R} = -\frac{\Delta R_2}{R_1}. \tag{3.34}$$

В мостах переменного тока сопротивлениями Z_3 и Z_4 часто являются обмотки дифференциального трансформатора (рис. 3.10).

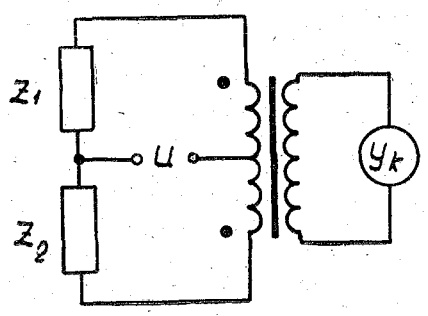


Рис. 3.10. Схема измерительного моста переменного тока с дифференциальным трансформатором.

При использовании мостов независимо от тщательности выполнения всегда бывает необходимо предварительное уравновешивание мостовой цепи. В мостовых цепях постоянного тока уравновешивание осуществляется изменением одного параметра цепи, а пе-

ременного тока — двух (активная и реактивная составляющие напряжения неравновесия) (рис. 3.11).

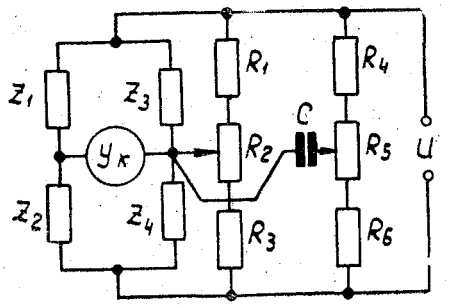


Рис. 3.11. Схема уравновешивания моста переменного тока по активной и реактивной составляющим.

Для поверки чувствительности мостовой схемы и всего измерительного тракта параллельно одному из сопротивлений плеч подключается высокостабильное «масштабное» сопротивление при помощи ключа таким образом, чтобы разуравновешивание составляло 0,5—0,75 номинального значения измеряемой величины.

§ 3.5. Структура и свойства приборов, построенных по методу уравновешивающего преобразования

Структурная схема прибора уравновешивания изображена на рис. 3.12.

Совокупность измерительных преобразователей $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n$, преобразующих выходную электрическую величину y_β в неэлектрическую величину x_β, называется цепью обратного преобра-

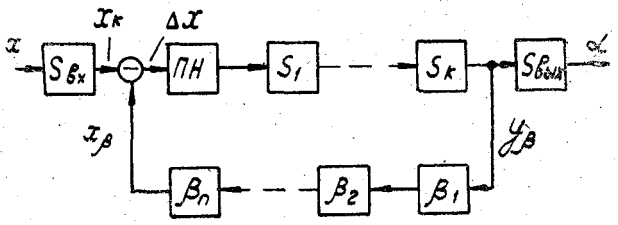


Рис. 3.12. Структурная схема прибора, построенного по методу уравновешивающего преобразования.

зования или просто обратной цепью прибора. Разность Δx между неэлектрической величиной $x_к$ и выходной величиной обратной цепи x_β подается на вход цепи $S_1, \ldots, S_к$ прямого преобразования или прямой цепи.

Обычно в приборах уравновешивания имеется ряд измерительных преобразователей, не охваченных обратной связью: $S_{вх}$ — входной измерительный преобразователь, преобразующий измеряемую неэлектрическую величину $x_{вх}$ в неэлектрическую величину $x_к$, однородную с величиной x_β. и $S_{вых}$ — выходной преобразователь, преобразующий электрическую величину y_β в выходную величину $y_{вых}$ прибора.

Входным преобразователем прямой цепи является преобразователь неэлектрической величины в электрическую, называемый преобразователем недокомпенсации (ПН). После него следует обычно усилитель и другие преобразователи (двигатели, модуляторы, демодуляторы, реле и др.), преобразующие усиленное напряжение в величину y_β.

Рассмотрим, как меняются свойства прибора при введении цепи обратного преобразования. Обозначим произведение чувствительностей всех преобразователей прямой цепи через S, а обратной — через β. Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_k - x_\beta, \\ y_\beta &= S\Delta x, \\ x_k &= \beta y_\beta. \end{aligned} \tag{3.35}$$

Решая эти уравнения относительно y_β, можно найти

$$y_\beta = \frac{S}{1+S\cdot\beta}\, x_k, \tag{3.36}$$

Следовательно, чувствительность части прибора, охваченной обратной цепью, равна

$$S_{о.п} = \frac{y_\beta}{x_k} = \frac{S}{1+S\cdot\beta}. \tag{3.37}$$

Если величина S изменяется вследствие изменения питающего напряжения, температуры, влажности, времени и т. п., то выходная величина y_β также будет изменяться. Изменение выходной величины за счет изменения чувствительности прямой цепи равно

$$dy_\beta = \frac{dS}{(1+S\cdot\beta)^2}\, x_k. \tag{3.38}$$

Относительное изменение входной величины

$$\frac{dy_\beta}{y_\beta} = \frac{1}{1+S\cdot\beta}\cdot\frac{dS}{S}. \qquad (3.39)$$

Отсюда видно, что относительное изменение выходной величины в $1 + S\beta$ раз меньше изменения чувствительности прямой цепи.

Величина $S\cdot\beta$ может быть сделана достаточно большой (десятки и сотни), поэтому в это же число раз может быть уменьшена погрешность, возникающая в прямой цепи.

Если происходит изменение чувствительности β в обратной цепи, то

$$\frac{dy_\beta}{y_\beta} = -\frac{S\cdot\beta}{1+S\cdot\beta}\,\frac{d_\beta}{\beta} \simeq -\frac{d_\beta}{\beta}, \text{ так как } S\cdot\beta \gg 1.$$

Следовательно, всякие изменения, происходящие в обратной цепи, вызывают точно такое же изменение выходной величины. Поэтому в обратной цепи желательно иметь минимальное количество преобразующих звеньев. В лучшем случае это будет один преобразователь, преобразующий выходную электрическую величину в неэлектрическую величину, называемый обратным преобразователем (ОП).

Конструктивной особенностью всех приборов уравновешивания является наличие в них обратного преобразователя. Очень часто обратный преобразователь и преобразователь недокомпенсации объединяются в один узел, вынесенный на измеряемый объект.

Приборы уравновешивания являются весьма точными (0,5 ÷ 0,1% и выше) и широко используются в гидрометеорологическом приборостроении (измерение атмосферного давления, радиоуровнемеры «Перекат» и др.). Такие приборы обладают и бо́льшим быстродействием благодаря наличию обратной цепи. При создании приборов, работающих по методу уравновешивающего преобразования, необходимо решать вопросы устойчивости. Эти вопросы наиболее полно рассматриваются в теории автоматического регулирования и управления.

§ 3.6. Обратные измерительные преобразователи

К обратным преобразователям (ОП) относится большая группа измерительных преобразователей, входной величиной которых является электрическая величина, а выходной — неэлектрическая.

К наиболее распространенным ОП относятся:

а. Магнитоэлектрические ОП. Принцип действия магнитоэлектрического ОП основан на взаимодействии электрического тока I, протекающего по катушке, с полем постоянного магнита. Сила взаимодействия равна

$$F = BlwI, \qquad (3.40)$$

где B — индукция в зазоре магнита; l — средняя длина витка катушки; w — число витков катушки; I — сила тока.

Магнитоэлектрические обратные преобразователи имеют линейную зависимость силы от величины тока, малые погрешности ($0{,}02 \div 0{,}05\%$), высокую стабильность и при массе 0,5 кг могут создать электромагнитную силу до 2 Н (около 200 г).

б. Электродинамические ОП. Принцип действия электродинамического ОП основан на взаимодействии двух катушек с электрическим током. Сила взаимодействия катушек пропорциональна произведению токов подвижной и неподвижной катушек. Если токи равны, то

$$F = \beta I^2. \qquad (3.41)$$

В электродинамическом преобразователе магнитные силовые линии замыкаются по воздуху, и силы в 100—1000 раз меньше, чем у магнитоэлектрического преобразователя.

Коэффициент преобразования β является сложной функцией геометрических размеров катушек и зависит от типа конструкции, формы катушек и числа витков.

Для увеличения силы катушки часто снабжаются сердечниками из ферромагнитного материала (ферродинамические ОП), но при этом возникают дополнительные погрешности вследствие гистерезиса.

Электродинамические ОП широко применяются в приборах уравновешивания для измерения расхода жидких сред по перепаду давления, поскольку расход $Q = \sqrt{\Delta p}$, и между Q и I имеет место линейная зависимость.

в. Электромагнитные ОП основаны на взаимодействии подвижного элемента из ферромагнитного материала с магнитным потоком, создаваемым катушкой

$$F = \frac{1}{2}\frac{dL}{d\alpha}I^2, \qquad (3.42)$$

где L — индуктивность катушки, Гн; α — перемещение подвижного сердечника, м; I — сила тока в обмотке катушки, А.

Точному расчету сила электромагнитного преобразователя не поддается, и при ее определении пользуются экспериментальными данными.

Достоинством их являются простота конструкции, отсутствие токопроводов к подвижному элементу, допустимость больших токов через катушку. Недостатком являются большие погрешности ($1 \div 0{,}5\%$), обусловленные наличием ферромагнитного материала.

г. Электростатические ОП основаны на возникновении силы между электрически заряженными телами.

Сила взаимодействия между двумя пластинами конденсатора

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S \frac{U^2}{\delta^2}, \qquad (3.43)$$

где U — напряжение между пластинами, В; δ — зазор, м; S — площадь пластин, м^2; ε_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха, Ф/м.

Силы взаимодействия весьма незначительны, поэтому электростатические преобразователи находят ограниченное применение.

д. Индукционные ОП основаны на взаимодействии электрических токов, индуктируемых в движущихся проводниках, с магнитным полем постоянных магнитов.

Выходной величиной такого преобразователя является момент M_β, а входной — угловая скорость ω диска или магнита.

Погрешности индукционного преобразователя вызываются изменением его геометрических размеров, индукции постоянного магнита и удельного сопротивления диска. Для уменьшения температурной погрешности индукционного преобразователя желательно выбирать такой материал диска, чтобы температурная погрешность его сопротивления корректировала температурную погрешность постоянного магнита.

Создаваемый момент составляет величину порядка (0,5—5) $\times 10^{-3}$ Н·м, т. е. раз в сто больше, чем у электродинамического преобразователя.

Наряду с рассмотренными ОП применяются:

е. Термострикционные ОП, действие которых основано на изменении размеров твердого тела или объема жидкости или газа. Входной величиной является температура, измеряемая термопарой или термометром сопротивления с высокой точностью. Преобразование температуры в изменение размеров линейно и стабильно. Недостатком является большая инерционность.

ж. Электрострикционные (обратный пьезоэлектрический эффект) и магнитострикционные ОП (обратный магнитострикционный эффект). Достоинством этих преобразователей является их высокая собственная частота. Недостатком — чрезвычайно малые перемещения, создаваемые ими.

з. Тепловые ОП: 1) основанные на выделении теплоты при прохождении электрического тока по сопротивлению

$$Q = I^2 R t \qquad (3.44)$$

и 2) основанные на эффекте Пельтье (эффект, обратный по отношению к эффекту термоэлектричества). Этот эффект заключается в том, что при прохождении тока I в цепи, состоящей из различных

проводников, в местах их контакта в зависимости от направления тока выделяется или поглощается некоторое количество теплоты. Эта теплота пропорциональна прошедшему через контакт количеству электричества It и некоторому коэффициенту η, зависящему от природы материалов и называемому коэффициентом Пельтье

$$Q = \Pi It, \tag{3.45}$$

где $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2)T$; ($\alpha_1$ и α_2) — коэффициенты термоэдс соответствующих материалов; T — абсолютная температура.

§ 3.7. Общие свойства приборов с частотными, временными и фазовыми измерительными устройствами

Измеряемая неэлектрическая величина может быть преобразована измерительным устройством не только в пропорциональную ей электрическую величину (ток, напряжение) или параметр электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность), но также в частоту электрических колебаний, разность фаз между двумя колебаниями или в длительность некоторого электрического процесса.

В соответствии с этим измерительные устройства можно разделить на две большие группы:

а) амплитудные (рассмотренные выше);

б) частотные, временные и фазовые.

Основное преимущество преобразования в фазу, отрезок времени и особенно в частоту заключается в том, что оно дает возможность резко уменьшить влияние почти всех последующих звеньев измерительной цепи на погрешность измерения. Другим достоинством этих приборов является возможность измерения с высокой точностью этих величин, причем результат измерения легко удается получить в цифровом виде.

Поскольку в современной технике измерения неэлектрических величин все большее место занимают высокоточные, в частности цифровые системы для централизованного контроля и измерения на расстоянии, то естественно, что частотным временным и фазовым измерительным устройствам уделяется все большее и большее внимание.

Все эти измерительные устройства могут быть разделены на две большие группы.

а. Частотные, временные и фазовые измерительные устройства развертывающего преобразования. В основе работы таких датчиков лежит зависимость

$$t = \frac{L}{v}, \tag{3.46}$$

где L — обобщенная координата; v — обобщенная скорость; t — время, с.

Если измеряемой величиной является, например, расстояние L или угол поворота φ, то величина скорости v (или угловой скорости ω) должна быть постоянной и известной. Время, необходимое для прохождения пути, прямо пропорционально длине этого пути.

Классическим примером использования таких устройств являются гидроакустические приборы для измерения глубины, уровня и расстояний на поверхности воды.

Если измеряемой величиной является скорость v (или угловая скорость ω), то величина L (или φ) должна быть постоянной и известной (база измерительного устройства).

Время прохождения базы обратно пропорционально скорости.

Такой метод хорошо известен в гидрометрии и широко используется при измерении скоростей течения воды поверхностными и глубинными поплавками, способом «ионного» поводка или с помощью радиоактивных изотопов. Этот же принцип положен в основу гидроакустического метода измерения скорости распространения звука в воде и скорости течения воды.

В обоих рассмотренных случаях выходной величиной является время и для его получения достаточно единственного цикла работы датчика.

Для того чтобы выходная величина была в виде частоты, нужно каждый раз, как только процесс прошел заданный путь, повторять все сначала. В этом случае частота прямо пропорциональна скорости движения и обратно пропорциональна пути.

Особенно широко используются частотные измерительные устройства с вращательным движением, поскольку угол поворота в большинстве случае равен $2\kappa\pi$, где κ — постоянное известное число.

На этом принципе производится измерение угловой скорости всех гидрометрических вертушек и, следовательно, скорости течения воды.

Для измерения скорости поступательного движения жидкости или газа в потоке создается так называемая «метка», т. е. некоторый объем, отличающийся по своим свойствам от остального вещества. Метки могут быть цветовые, солевые, световые, тепловые, ионные или радиоактивные.

Основными погрешностями приборов с измерительными устройствами развертывающего преобразования являются погрешность от непостоянства скорости при измерении пути или непостоянства пути (базы) при измерении скорости. Другим источником погрешности является неточность определения моментов начала и конца процесса, а в частотных измерительных устройствах и время переходных процессов при окончании одного цикла и начале следующего.

б. Частотные, временные и фазовые измерительные устройства, с колебательными системами (резонаторами). Это наиболее распространенная группа измерительных устройств. В зависимости от принципа действия они делятся на:

а) электрические (на основе LC, RC или LR цепей);

б) механические (струнные и камертонные);

в) акустические резонаторы.

Структурные схемы приборов с резонаторами зависят от вида возбуждаемых в резонаторе колебаний. С этой точки зрения все измерительные устройства могут быть разбиты на три группы: в одной используются свободные колебания резонатора, в другой — вынужденные колебания и в третьей — автоколебания.

Последняя группа обладает такими ценными свойствами, как простота схемы, непрерывность и автоматичность работы; поэтому они нашли преимущественное распространение.

Частота колебаний генератора с контуром, содержащим индуктивность L и емкость C равна

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (3.47)$$

Если в качестве L или C использовать индуктивный или емкостный измерительный преобразователь, для которых справедливо

$$L = f_1(x) \quad \text{или} \quad C = f_2(x),$$

где x — измеряемая неэлектрическая величина, то и частота f оказывается функцией измеряемой величины x.

В большинстве случаев частота f нелинейно зависит от измеряемой величины x, поэтому используют дифференциальные измерительные устройства, состоящие из двух генераторов. У одного генератора частота f_1 увеличивается с увеличением x, а у другого — уменьшается.

Разность частот

$$\Delta f = f_1 - f_2,$$

при условии $f_1 - f_2 \ll f_1 + f_2$, линейна в широком диапазоне изменения измеряемой величины x.

Если измеряемая величина x преобразована в активное сопротивление R, то могут быть использованы RC — генераторы синусоидальных или несинусоидальных колебаний (мультивибраторы и др.), основные частоты колебаний которых пропорциональны $\frac{1}{\sqrt{R}}$.

Частота колебаний струны зависит от длины ее, массы и силы натяжения

$$f = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{F}{ml}}, \qquad (3.48)$$

где f — частота колебаний струны, Гц; l — длина, м; m — масса всей струны, кг; F — сила натяжения, Н.

С помощью таких измерительных устройств можно измерять усилия, давления, деформации и другие величины, предварительно преобразованные в силу или деформацию струны.

В акустических резонаторах используются стоячие звуковые волны в столбе газа, жидкости или твердого тела.

В акустическом резонаторе укладывается всегда целое число четвертей волны (четное или нечетное в зависимости от граничных условий). Частотой акустических резонаторов можно управлять, воздействуя либо на скорость распространения звука (изменение температуры, плотности газа), либо на длину резонатора (изменение уровня).

Погрешности измерительных устройств с резонаторами можно разделить на три составляющие:

1) погрешность преобразования измеряемой величины в промежуточную величину, от которой непосредственно зависит собственная частота резонатора;

2) зависимость частоты резонатора от других элементов генератора (емкости при использовании индуктивного преобразователя или индуктивности при использовании емкостного преобразователя, параметров ламп или полупроводниковых триодов, емкости монтажа и паразитных емкостей и т. д.);

3) зависимость частоты резонатора от затухания (добротности).

§ 3.8. Измерительные цепи для частотных временных и фазовых измерительных устройств

В измерительном устройстве частота, фаза или промежуток времени могут быть использованы двумя путями. Можно с помощью частотных, фазовых и временных демодуляторов (фазовые, частотные и временные демодуляторы подробно рассматриваются в курсе «Основы электроники и автоматики») преобразовать эти величины в напряжение или ток, а последние измерять обычными методами. Такое измерительное устройство называется аналоговым.

Другой путь состоит в том, что с помощью счетчиков импульсов частота, фаза или время преобразуются в числовой код, который может быть представлен на цифровом табло, передан на цифропечатающее регистрирующее устройство или использован для автоматической обработки данных с помощью вычислительной техники. Такое измерительное устройство называется цифровым.

Аналоговые измерительные устройства имеют точность порядка 0,5—1% и используются для создания приборов средней точности. Цифровые измерительные устройства являются самыми совершенными измерительными устройствами.

§ 3.9. Цифровой частотомер

Цифровые методы измерения частоты основаны на том, что частоту любого периодического процесса можно выразить числом периодов этого процесса в единицу времени.

Общая структурная схема цифрового частотомера представлена на рис. 3.13.

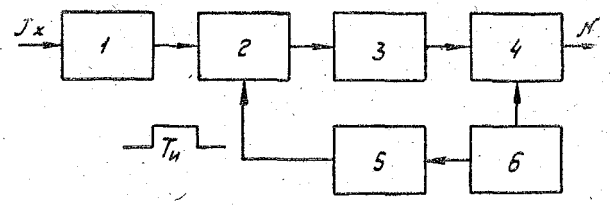


Рис. 3.13. Структурная схема цифрового частотомера:

1 — усилитель-формирователь; *2* — ключ; *3* — счетчик импульсов; *4* — отсчетное устройство; *5* — генератор точных интервалов времени; *6* — управляющее устройство.

На вход частотомера поступает периодическое напряжение произвольной формы; усилитель-формирователь *1* превращает его в последовательность импульсов так, что на каждый период входного напряжения приходится по одному импульсу. Эти импульсы поступают через ключ *2* на счетчик импульсов *3*, соединенный с отсчетным устройством *4*.

Ключ *2* отпирается тогда, когда с генератора точных интервалов времени *5* на него поступает разрешающее напряжение («временные ворота»). Таким образом, счетчик подсчитывает число периодов входного напряжения за время пока открыт ключ. Если продолжительность открытого состояния ключа составляет равно одну секунду, то после окончания счета показания счетчика будут соответствовать значению частоты входного напряжения, выраженной в герцах, если ключ открыт одну десятую секунды, то отсчет получится в десятках герц, если на одну миллисекунду — в килогерцах и т. д.

В общем случае число импульсов N, зарегистрированное отсчетным устройством, равно

$$N = f_x T_и, \tag{3.49}$$

где f_x — измеряемая частота, Гц; $T_и$ — время измерения, с.

После того, как отсчет получен, принят к сведению или зарегистрирован, счетчик снова устанавливается в нулевое положение, и счет импульсов может быть начат снова. Для автоматического выполнения этих функций служит управляющее устройство *6*. Оно задает периодичность измерений и перед каждым очередным измерением сбрасывает показания счетчика на нуль.

Погрешность измерения определяется, прежде всего, самим числом зарегистрированных импульсов. Очевидно, что оно может быть только целым. Любой цифровой прибор дает отсчет, округленный до целого числа. Погрешность, возникающая при этом округлении, называется погрешностью квантования (или погрешностью дискретности).

Для цифрового частотомера эта погрешность составляет ± 1 импульс или $\pm \frac{1}{T_1}$ Гц, где $T_и$ — время счета.

Другая составляющая погрешности цифрового частотомера — погрешность измерительного времени. В современных цифровых частотомерах для получения точного измерительного времени используются кварцевые генераторы. При стабилизации температуры погрешность не превышает $(1 \div 2) \cdot 10^{-5}$ от частоты 100 кГц.

Для получения измерительного времени в 1 и даже 10 с используются делители частоты.

Измерение промежутков времени можно производить по только что рассмотренной схеме, почти не переделывая ее. В этом случае частота от кварцевого генератора подается на счетчик, а в качестве времени счета берется измеряемое время. И в этом случае число зарегистрированных счетчиком импульсов равно

$$N = f_0 T_x, \tag{3.50}$$

но с другими индексами.

Эта же схема позволяет измерять отношение двух частот. В этом случае период одной из них (более низкой или разделенной в некоторое число раз) используется в качестве времени измерения, а другая частота поступает через ключ на счетчик импульсов. В этом случае

$$N = f_1 T_2 = \frac{f_1}{f_2}, \tag{3.51}$$

где f_1 и f_2 — измеряемые частоты.

В режиме интегрирования счет ведется непрерывно в течение всего времени измерения. В этом случае используются только блоки *1, 2, 3* и *4* и устройство для установки нуля.

§ 3.10. Метод построения приборов со счетными измерительными устройствами

Существует ряд устройств, в которых входная величина представляется не частотой или временем, а прямо числом импульсов, требующих только счета. В соответствии с принятой классификацией преобразователей непрерывных величин в дискретные такие устройства называются счетными.

Наиболее широкая область их применения — измерение линейных и угловых перемещений и величин, преобразуемых в эти перемещения.

Это направление довольно широко используется в гидрологическом приборостроении, в частности, в ряде приборов, разработанных А. М. Димаксяном. Более подробно гидрологические приборы со счетными измерительными устройствами рассматриваются в гл. IV.

§ 3.11. Метод построения приборов со считывающими измерительными устройствами

Другая большая группа дискретных устройств отличается от счетных тем, что даже операция счета импульсов при работе с этими устройствами излишняя — выходным сигналом служит непосредственно код. Такие устройства называются считывающими. Они имеют различное конструктивное выполнение в виде кодовых масок, барабанов и т. п., в которых используются различные коды (двоичный код, код Грея, телетайпный, Морзе и др.).

Приборы со считывающими устройствами также начали широко использоваться в гидрометеорологическом приборостроении (см. гл. IV).

§ 3.12. Техническое задание на проектирование прибора

Проектирование любого прибора, как правило, начинается с составления технического задания на проектирование. Грамотная разработка технического задания является одним из наиболее ответственных этапов по созданию прибора, узла или устройства.

Техническое задание охватывает все аспекты разрабатываемого прибора и является единственным документом, определяющим отношения между заказчиком и исполнителем.

Типовое техническое задание на проектирование выглядит следующим образом.

Техническое задание на проектирование « »

(полное наименование проектируемого прибора с указанием типа, индекса и т. д.).

Раздел I. Назначение и комплектность

1. Прибор предназначается для измерения (записи, передачи на расстояние, ввода в вычислительную машину и т. д.) значений (подробное указание измеряемой величины).

2. В комплект прибора должны входить:

а) _____
(перечисляются собственные конструктивные блоки прибора)

б) _____
(перечисляются заимствуемые серийные узлы и приборы)

Раздел II. Эксплуатационные условия

3. Прибор должен питаться от источника (постоянного или переменного) тока с напряжением В и частотой Гц.

4. Величина питающего напряжения может изменяться в пределах ± %.

5. Частота питающего напряжения может изменяться в пределах ± %.

6. Температура окружающей среды может изменяться в пределах от до °С со скоростью не более град/ч (отдельно для каждого узла прибора, если они находятся в разных условиях).

7. Предельно допустимое время непрерывной работы при максимальных значениях температуры окружающей среды не менее ч. Время непрерывной работы при нормальной температуре °С не менее ч.

8. Вибрация и тряска происходит с ускорением до м/с^2 в диапазоне частот от до Гц.

9. Давление окружающей среды изменяется в пределах от до кН/м^2.

10. Относительная влажность окружающей среды при температуре °С может изменяться от до %.

11. При понижении температуры на приборе возможно выпадение инея или обледенения.

12. Возможно выпадение на прибор осадков в виде дождя и снега, брызг морской воды (или других агрессивных жидкостей или газов).

Раздел III. Технические требования

13. Пределы изменения измеряемой величины.
14. Характер изменения измеряемой величины во времени.
15. Пределы измерения проектируемого прибора.
16. Способ переключения пределов измерения.
17. Требования к входному преобразователю, ограничивающие степень воздействия прибора на объект измерения.
18. Требования к выходной цепи прибора (способ регистрации показаний прибора, выходной ток или напряжение и т. п.).
19. Частотный диапазон прибора.
20. Допустимая результирующая погрешность прибора (при условиях работы, оговоренных в разделе II).

Раздел IV. Требования к конструкции

21. Требования к конструктивному оформлению каждого из узлов проектируемого прибора.
22. Допустимые габаритные размеры каждого из узлов прибора.
23. Допустимые массы каждого из узлов прибора.
24. Конструктивное оформление способа крепления каждого из узлов прибора.
25. Конструктивное выполнение электрических соединений узлов прибора между собой, с источником питания и потребителями информации.
26. Требования, предъявляемые к художественному оформлению основных узлов прибора.

Раздел V. Требования к технической документации

27. Содержание технической документации, представляемой в результате проведенной разработки (пояснительная записка, технический отчет, протокол испытаний, чертежи).
28. Конкретное указание вида и содержания сборочных и рабочих чертежей.

Техническое задание по всем вопросам обязательно согласуется с исполнителем.

Глава IV

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ

§ 4.1. Классификация методов измерения уровня воды

Основные методы измерения уровня воды представлены на рис. 4.1.

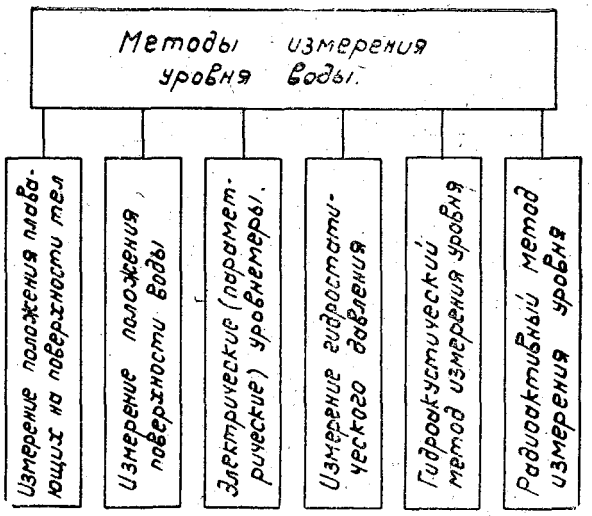


Рис. 4.1. Методы измерения уровня воды.

Для измерения уровня воды в естественных условиях в настоящее время широко используются два основных метода: метод, основанный на измерении положения плавающих на поверхности воды тел (реже положения самой поверхности воды), и метод, основанный на измерении гидростатического давления, зависящего от уровня воды над приемником давления.

Гидроакустический метод измерения уровня не нашел пока широкого применения в гидрометрии, хотя и представляет значительный интерес. Теория работы гидроакустического уровнемера будет рассмотрена в гл. V одновременно с рассмотрением эхолотов, имеющих в методах измерения много общего.

Использование радиоактивных уровнемеров не вызывается необходимостью в гидрометрии. Поэтому такие уровнемеры не разрабатываются и не рассматриваются в этом курсе.

§ 4.2. Метод, основанный на измерении положения плавающих тел

Этот метод измерения уровня используется в широко известных поплавковых уровнемерах: самописце уровня «Валдай» и самописце уровня воды длительного действия ГР-38.

Принцип действия поплавкового уровнемера представлен на рис. 4.2.

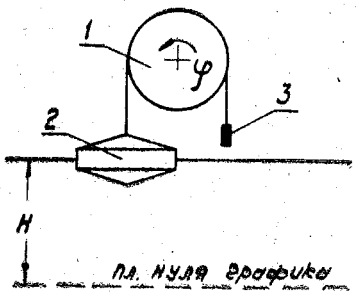


Рис. 4.2. Принцип действия поплавкового уровнемера:
1 — поплавковое колесо; *2* — поплавок; *3* — противовес.

Между уровнем H относительно плоскости нуля графика и углом поворота φ поплавкового колеса *1* имеет место линейная зависимость

$$H = \frac{R_{кол}}{\pi}\varphi + H_0 = \frac{R_{кол}}{180^\circ}\varphi^\circ + H_0, \qquad (4.1)$$

где $R_{кол}$ — радиус поплавкового колеса, м; φ — угол поворота, рад или град; H_0 — уровень воды, при котором угол поворота поплавкового колеса равен 0, м.

Из формулы (4.1) следует, что каждому значению уровня воды соответствует определенный угол поворота поплавкового колеса. Этот угол может быть зарегистрирован непосредственно на бумаге (самописцы уровня), передан на расстояние с помощью сельсин-

ной синхронной передачи или число-импульсной следящей системы, преобразован в тот или иной код с помощью датчиков считывания (устройства «Вал—цифра») или с помощью реостатного преобразователя (иногда индуктивного преобразователя), преобразован в изменение тока или напряжения, измеряемые стрелочным прибором.

На рис. 4.3 изображена число-импульсная дистанционная система передачи уровня воды (в несколько упрощенном варианте она использовалась для измерения уровня воды на реке Ингул в 1876 г., являясь первой в мире телеизмерительной системой) [1, 2].

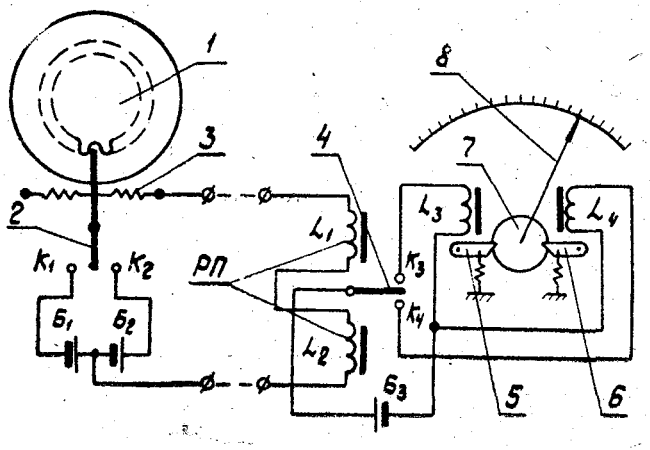


Рис. 4.3 Число-импульсная дистанционная система передачи уровня воды:
1 — зубчатое колесо; *2* — якорь; *3* — пружина; *4* — якорь поляризованного реле; *5* — храповик левый; *6* — храповик правый; *7* — храповое колесо; *8* — стрелка указателя.

Зубчатое колесо *1* своими зубьями отклоняет якорь *2* контактного преобразователя, удерживаемый в среднем положении пружиной *3*. В зависимости от направления вращения колеса *1* замыкаются контакты K_1 или K_2. При этом происходит срабатывание поляризованного реле *РП*. Срабатывание реле приводит к отклонению якоря *4* и замыканию контактов K_3 или K_4. Замыкание этих контактов вызывает срабатывание электромагнитов L_3 или L_4, притяжение якорей *5* или *6*, поворот храпового колеса *7* и стрелки *8* на некоторый угол.

Рассмотрим погрешности поплавковых уровнемеров. Всякое изменение угла поворота поплавкового колеса при неизменном положении уровня вызывает погрешность измерения.

Изменение угла поворота колеса при неизменном уровне может быть вызвано, прежде всего, перемещением оси поплавкового колеса, например, из-за смещения основания, на котором установлен корпус записывающего устройства самописца.

Абсолютная погрешность ΔH_1 измерения уровня равна величине смещения оси в вертикальном направлении.

Изменение угла поворота может быть вызвано удлинением части тросика, находящегося между поплавком *2* и колесом *1* (рис. 2), вследствие растяжения, изменения температуры и т. п. Абсолютная погрешность ΔH_2 также равна абсолютной величине удлинения тросика.

Погрешность измерения уровня возникает и тогда, когда уровень изменяется, а колесо остается неподвижным, например, из-за моментов сил трения, приведенных к оси поплавкового колеса (собственного момента трения на оси поплавкового колеса, моментов трения кинематической передачи и момента, создаваемого пером или карандашом).

Если приведенный момент трения на оси поплавкового колеса равен $M_{тр}$, то погрешность измерения уровня ΔH_3 может быть найдена из условия

$$M_{тр}=M_{попл}, \tag{4.2}$$

где $M_{попл}$ — полезный момент, создаваемый поплавком, Н·м.

Архимедова сила поплавка при погружении (или подъеме) на величину ΔH_3 равна

$$F_{попл}=\gamma\pi R^2_{попл}\Delta H_3, \tag{4.3}$$

где γ — удельный вес воды; $R_{попл}$ — радиус поплавка, м.

Из (4.2) и (4.3) можно найти

$$\Delta H_3=\frac{M_{тр}}{\gamma\pi R^2_{попл}R_{кол}}. \tag{4.4}$$

Погрешность может возникать от проскальзывания нити по поплавковому колесу, поэтому необходима периодическая поверка нуля уровнемера. Иногда вместо тросика используется перфорированная лента, а поплавковое колесо снабжается выступами, входящими в отверстие ленты.

Если при подъеме уровня груз *3* (рис. 4.1) погружается в воду, то возникает погрешность ΔH_4, которая может быть найдена из условия

$$\gamma\pi R^2_{попл}\Delta H_4 R_{кол}=\gamma V_г\cdot R_{кол}, \tag{4.5}$$

где $V_г$ — объем груза и части тросика, погруженных в воду.

Отсюда

$$\Delta H_4 = \frac{V_г}{\pi R^2_{попл}}. \qquad (4.6)$$

Как видно из выражений (4.4) и (4.6), эти составляющие погрешности обратно пропорциональны квадрату радиуса поплавка.

Кроме рассмотренных статических погрешностей могут иметь место погрешности, вызываемые волнением поверхности воды. Для уменьшения этих погрешностей поплавок помещается в специальный колодец, соединяемый трубкой с водоемом.

Если диаметр колодца равен $D_к$, а трубы — $d_т$, то для малых перепадов уровня (ламинарный режим) можно написать

$$Q = \frac{\Delta p}{R}, \qquad (4.7)$$

где Q — расход воды в трубе, $\frac{м^2}{с}$; Δp — перепад давления, $\frac{Н}{м^2}$;

R — гидравлическое сопротивление трубы, $\frac{Н \cdot с}{м^3}$.

Для трубы длиной l

$$R = \frac{128\,\mu l}{\pi d_т^4}, \qquad (4.8)$$

где μ — коэффициент внутреннего трения или вязкость, $\frac{Н \cdot с}{м^2}$.

Перепад давления

$$\Delta p = \gamma (H_1 - H_2), \qquad (4.9)$$

где H_1 и H_2 — уровни воды в водоеме и колодце соответственно, м.

Расход Q приводит к изменению уровня в колодце

$$Q = \frac{\pi D_к^2}{4} \cdot \frac{dH_2}{dt}. \qquad (4.10)$$

Из (4.7), (4.8), (4.9) и (4.10) можно найти

$$\frac{32 D_к^2 \mu l}{\gamma d_т^4} \frac{dH_2}{dt} + H_2 = H_1 \qquad (4.11)$$

Следовательно, колодец с трубой представляет собой динамическое звено первого порядка (см. § 3.3). Постоянная времени T этого звена равна

$$T = \frac{32 D_к^2 \mu l}{\gamma d_т^4} \text{ с.} \tag{4.12}$$

Если уровень воды H_1 в водоеме изменяется по закону

$$H_1 = H_0 + \delta H_1 \sin \omega t, \tag{4.13}$$

то уровень воды в колодце будет следовать уравнению

$$H_2 = H_0 + \delta H_2 \sin (\omega t - \varphi),$$

причем амплитуда δH_2 будет равна

$$\delta H_2 = \frac{\delta H_1}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}. \tag{4.14}$$

Следовательно, коэффициент сглаживания

$$K = \frac{\delta H_1}{\delta H_2} = \sqrt{1 + T^2 \omega^2}. \tag{4.15}$$

С увеличением постоянной времени T коэффициент сглаживания увеличивается, однако увеличение T может вызвать ошибку в измерении уровня при подъеме и спаде воды.

Если уровень воды в водоеме будет изменяться с постоянной скоростью $\frac{dH_1}{dt} = \dot{H}_0$, то установившаяся ошибка в измерении уровня будет равна

$$\Delta H_5 = \dot{H}_0 T. \tag{4.16}$$

Формулы (4.12), (4.15) и (4.16) являются исходными формулами для проектирования колодцев, реек с успокоителем, пьезометров и других устройств для сглаживания колебаний уровня воды при условии, что число Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} < 2000, \tag{4.17}$$

где v — средняя скорость воды в трубе, м/с; d — диаметр трубы, м; ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с, равный $\frac{\mu}{\rho}$, где ρ — плотность воды, кг/м³.

Поплавковые уровнемеры характеризуются довольно высокой точностью и большим диапазоном измерения уровня (до 10 м и более при погрешности 1÷2 см), простотой и надежностью конструкции.

Недостатком является малое быстродействие, необходимость строительства специальных сооружений (колодец и будка), невозможность работы при замерзании воды в колодце и засорении соединительной трубы.

§ 4.3. Метод, основанный на измерении положения поверхности воды

Этот метод чаще всего реализуется в лабораторных условиях (при измерении уровня в мерных баках, водосливах, пьезометрах и др.) и реже в натурных (гидрометрических лотках, испарителях и др.) с помощью игольчатых реек, снабженных делениями и нониусом.

Момент касания иглою поверхности воды фиксируется либо визуально, либо электрическим методом с использованием электролитического преобразователя (см. § 2.6). Одним электродом является игла, а другим электродом — пластина, находящаяся в воде и имеющая поверхность много больше поверхности иглы (часто вторым электродом служат стенки сосуда). В дистанционных гидрометрических установках ГР-70 и ГР-64 вторым электродом является корпус гидрометрического груза.

Сопротивление электролитической ячейки зависит от площади электрода и для иглы составляет десятки и сотни килоом, поэтому для работы указателя (стрелочного прибора, реле, лампочки накаливания) необходимо предварительное усиление.

На рис. 4.4 изображена схема для фиксации момента касания иглою поверхности воды. Индикатором касания является лампочка накаливания 2,5 в, 0,15 а.

При спокойной поверхности воды погрешность фиксации уровня составляет 0,1 мм.

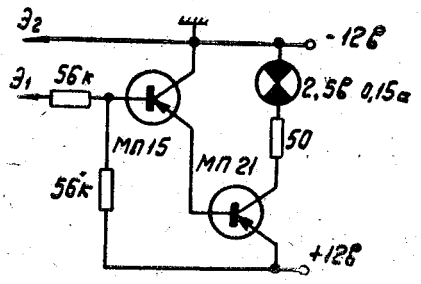


Рис. 4.4. Схема световой индикации момента касания электродом поверхности воды.

Для измерения уровня при наличии волнения поверхности воды используется схема, изображенная на рис. 4.5.

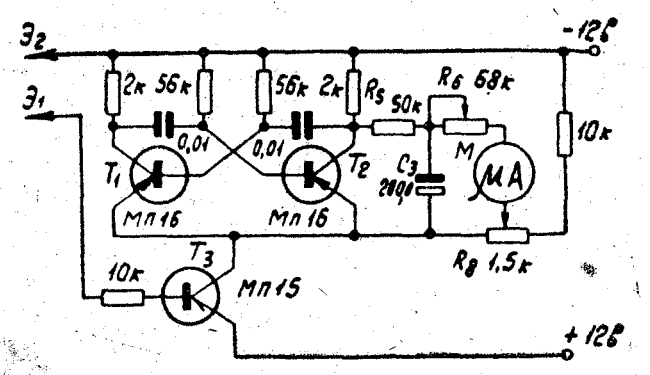


Рис. 4.5. Схема измерения среднего значения уровня при наличии волнения поверхности воды.

Триоды T_1 и T_2 образуют симметричный мультивибратор с частотой около 1000 гц. Работой мультивибратора управляет триод T_3. Если электрод $Э_1$ не находится в воде, то триод T_3 заперт, мультивибратор не работает, и через стрелочный прибор M идет очень незначительный ток.

Сопротивление P_8 служит для установки стрелки прибора на нуль.

Если электрод $Э_1$ погружен в воду, то триод T_3 отпирается, мультивибратор начинает работать, и через стрелочный прибор идет пульсирующий ток. Величина тока может регулироваться сопротивлением R_6 для установки стрелки прибора на максимальное деление шкалы.

Если электрод $Э_1$ часть времени находится в воде, а часть — на воздухе, то средний ток через прибор будет меньше максимального. Отсчет уровня снимается, когда стрелка прибора находится на середине шкалы.

Сопротивление R_5 и емкость C_1 служат для сглаживания колебаний стрелки при наличии пульсаций уровня.

На рис. 4.6 изображена схема высокоточного измерителя уровня воды в испарителях, разработанного в ГГИ А. М. Димаксяном.

При включении питания (24 в постоянного тока) двигатель *1* начинает вращаться, вращая микрометрический винт *2*. Гайка *3* с контактной иглой *4* получает поступательное движение вниз. При контакте иглы с поверхностью воды срабатывает реле P_1, включенное в коллекторную цепь триода T_1. Двигатель меняет направ-

ление своего вращения, и гайка с иглой возвращаются в крайнее верхнее положение, замыкая верхние блокировочные контакты *6*. Замыкание контактов вызывает срабатывание реле P_2, остановку двигателя и замыкание цепи контрольной лампочки на пульте управления.

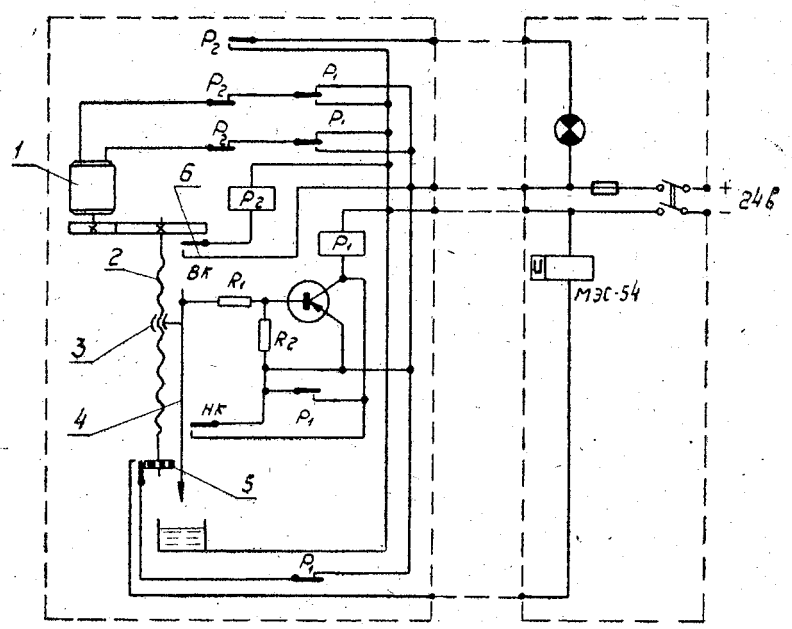


Рис. 4.6. Схема высокоточного измерителя уровня воды в испарителе:
1 — двигатель; *2* — микрометрический винт; *3* — гайка микрометрического винта; *4* — игла; *5* — кулачок с выступами; *6* — верхние блокировочные контакты.

На оси винта *2* имеется кулачок с пятью выступами, которые обеспечивают посылку пяти импульсов за 1 оборот винта в линию связи от уровнемера к счетчику импульсов, находящемуся в пульте управления. Так как шаг винта равен 0,5 мм уровня, то один импульс соответствует 0,1 мм уровня. Подача импульсов тока происходит в течение всего времени движения иглы из своего верхнего (реперного) положения до момента касания иглою поверхности воды. Выходной величиной является число импульсов, связанное линейной зависимостью с уровнем воды в испарителе, причем большему уровню соответствует меньшее число импульсов и наоборот.

§ 4.4. Электрические (параметрические) уровнемеры

Электрические уровнемеры обладают той особенностью, что в них отсутствуют механические звенья в структурной схеме прибора. Благодаря этому они имеют компактные, простые и надежные конструкции.

Наиболее часто используют емкостные преобразователи (см. § 2.2). Диаметр труб выбирается порядка 20÷50 мм, зазор между трубами около 1,5÷2 мм. Иногда используют плоские конденсаторы. Если жидкость проводящая, то пластины покрываются слоем изоляционного вещества, диэлектрические свойства которого учитываются при расчете уровнемера.

Основной погрешностью является температурная погрешность, вызываемая изменением диэлектрической проницаемости воды и геометрических размеров емкостного преобразователя.

Изменение емкости, а следовательно, и уровня может быть преобразовано при помощи равновесных или неравновесных мостов переменного тока в напряжение или ток или с помощью частотных датчиков — в частоту.

Для электропроводных жидкостей, как например вода, могут быть использованы проволочные преобразователи активного сопротивления (рис. 4.7). Две проволоки *1* с большим удельным сопротивлением натянуты между дном и крышкой параллельно друг другу.

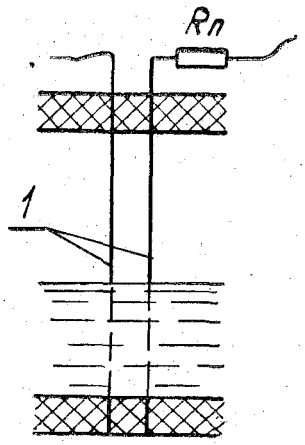


Рис. 4.7. Схема проволочного преобразователя уровня воды в активное сопротивление:
1 — проволока.

Если электропроводность воды много больше, чем сопротивление проволок, то вода будет играть роль щеток реостатного преобразователя (см. § 2.3). Сопротивление R преобразователя зависит от уровня

$$R = \frac{2\rho(H_0 - H)}{S}, \qquad (4.18)$$

где ρ — удельное сопротивление проволок, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{М}}$; H_0 и H — длина проволок и уровень воды, м; S — площадь поперечного сечения проволок, мм^2.

Проволоки включают в плечо моста, питаемого малым напряжением переменного тока для исключения появления на поверхности проволок пузырьков газа. Для компенсации положительной температурной погрешности проволок последовательно с ними включается полупроводниковое сопротивление $R_п$, обладающее отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Если вода плохо проводит электрический ток, то необходимо учитывать сопротивление участка жидкости между электродами; сопротивление при этом не будет линейно зависеть от уровня. Диапазон измерения уровня при использовании параметрических уровнемеров обычно невелик (до 0,5 м), но они практически безынерционны, что позволяет использовать их для измерения волнения.

§ 4.5. Метод, основанный на измерении гидростатического давления

Этот метод измерения уровня является самым перспективным в гидрометрии и в настоящее время широко используется и развивается.

В основе этого метода лежит зависимость

$$p = \gamma H + p_0, \qquad (4.19)$$

где p — абсолютное давление, действующее на приемную часть датчика на расстоянии H от поверхности воды, Н/м^2; p_0 — атмосферное давление на поверхности воды, Н/м^2; γ — удельный вес воды, Н/м^3.

Отсюда основное уравнение гидростатического уровнемера имеет вид

$$H = \frac{p - p_0}{\gamma}.$$

Основная погрешность гидростатического уровнемера зависит от изменения удельного веса γ воды вследствие аэрации, мутности и температуры (плотность воды изменяется на 0,5% при изменении температуры от 0 до 30° С).

Другой составляющей погрешности является погрешность измерения разности давлений, зависящая от конструкции датчика давления.

Имеются две разновидности гидростатических уровнемеров. К первой относятся уровнемеры, в которых гидростатическое давление сначала с помощью диафрагмы преобразуется в силу, а затем в деформацию, измеряемую емкостным, индуктивным или тензометрическим преобразователем.

Деформация упругих элементов, как правило, очень мала, а цепь преобразований — значительная, поэтому точность таких приборов весьма невысокая (несколько процентов). Такие приборы используются, главным образом, для измерения пульсаций давлений. При измерении давления значительный интерес могут представлять струнные датчики, так как частота колебаний струны изменяется в широких пределах при незначительных ее деформациях. Кроме того, частота электрических колебаний может без дополнительных погрешностей передаваться на любые расстояния. Погрешность измерения уровня достигает 0,2%.

Хорошие результаты достигаются при использовании метода уравновешивающего преобразования.

На рис. 4.8 представлен уровнемер, разработанный в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте

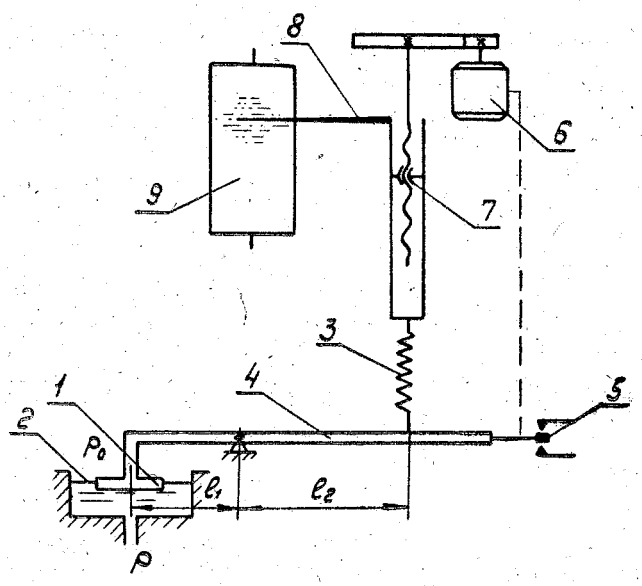


Рис. 4.8. Схема мареографа «Перекат»:
1 — поршень; *2* — резиновая диафрагма; *3* — пружина; *4* — коромысло; *5* — контактный преобразователь; *6* — двигатель; *7* — гайка микрометрического винта; *8* — «считывающий ус»; *9* — кодовый барабан.

(ААНИИ) и используемый для измерения уровня воды на барах рек (мареограф «Перекат»).

Давление p столба воды преобразуется в силу поршнем *1*, герметизированным резиновой диафрагмой *2*. Компенсирующий момент создается цилиндрической пружиной *3*, прикрепленной к коромыслу *4*. Отклонение коромысла от положения равновесия фиксируется контактным преобразователем *5*, который управляет направлением вращения двигателя *6* в соответствующую сторону до тех пор, пока коромысло не займет положения равновесия. Таким образом, величине давления p будет соответствовать определенное натяжение пружины, и следовательно, определенное положение гайки *7* микрометрического винта.

С гайкой винта тесно связан, так называемый «считывающий ус» *8*, который скользит по кодовому барабану *9*. На поверхность кодового барабана нанесен код Морзе (значения уровня в см и позывные уровнемера). При прокручивании барабана ус, попадая на проводящие и непроводящие участки барабана, управляет работой (осуществляет манипуляцию) радиопередатчика, который передает данные об уровне проходящим судам.

Ошибка измерения уровня при таком методе измерения давления, как показывает анализ работы уровнемера [3], равна

$$\Delta H = \frac{\sqrt{2}\, bCl_2}{\gamma S_{эфф}\, l_1}, \qquad (4.20)$$

где b — зазор между якорем и одним из контактов преобразователя, м; l_1 и l_2 — плечи коромысла, м; $S_{эфф}$ — эффективная площадь поршня, м^2; C — жесткость пружины, Н/м.

Относительная погрешность измерения равна

$$\delta H = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\sqrt{2}\, b}{Z}, \qquad (4.21)$$

где Z — перемещение гайки, соответствующее данному значению уровня H, м.

Но величина Z_{max} должна соответствовать длине кодового барабана h_{max}, следовательно,

$$\delta H = \frac{\sqrt{2}\, b}{h_{max}}. \qquad (4.22)$$

Если задаться величиной $\delta H = 0{,}1\%$ (1 см при 10 м уровня), то при $h_{max} = 200$ мм величина зазора между контактами должна быть равной 0,141 мм, что вполне осуществимо.

Некоторым недостатком использования пружины для создания уравновешивающего момента является ее старение и гистерезис.

Значительно лучше результаты достигаются при использовании груза, передвигаемого по коромыслу двигателем. Такой прибор разработан в НИИ гидрометеорологического приборостроения (рис. 4.9).

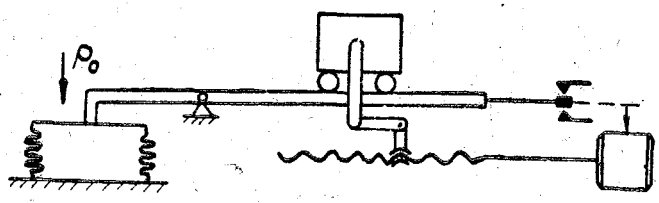


Рис. 4.9. Грузовая схема компенсации сил давления.

Другой разновидностью гидростатических уровнемеров являются уровнемеры с воздушным колоколом.

Зависимость между абсолютным давлением p воздуха под колоколом и глубиной погружения нижней кромки колокола (рис. 4.10) равна

$$p=\gamma(H-x)+p_0,$$

где x — уровень воды в колоколе, м.

Величина x в общем случае является сложной функцией глубины и конфигурации колокола. Можно показать [4], что если колокол представляет собой гиперболоид вращения, то уровень воды в колоколе пропорционален глубине H, т. е.

$$x = \kappa H \tag{4.23}$$

где κ — безразмерный коэффициент пропорциональности, $\kappa < 1$.

В этом случае

$$H = \frac{p-p_0}{\gamma(1-k)}. \tag{4.24}$$

Уровнемеры с воздушным колоколом обладают тем преимуществом, что давление воздуха может быть с помощью воздушной магистрали передано на поверхность воды для размещения измерительной аппаратуры в более благоприятных условиях для работы, поверки и настройки.

Анализ методических погрешностей показывает [4], что изменение температуры t воды и атмосферного давления p_0 может вызывать дополнительные погрешности измерения. Величина этой погрешности пропорциональна некоторому параметру τ (приведенная высота колокола), имеющего размерность длины. Для уменьшения

этих погрешностей следует стремиться делать колокол наибольшего сечения и наименьшей высоты (параметр τ при этом будет мал).

Разность давлений $p - p_0$ в этом случае измеряется чаще всего с помощью ртутных манометров с U-образной трубкой (рис. 4.11).

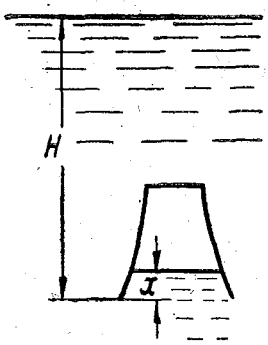


Рис. 4.10. Воздушный колокол.

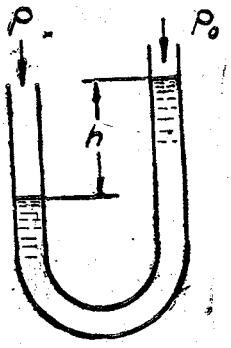


Рис. 4.11. Дифференциальный ртутный манометр.

Разность уровней в левом и правом колене однозначно связана с разностью давлений воздуха

$$p - p_0 = \gamma_{рт} h, \tag{4.25}$$

где $\gamma_{рт}$ — удельный вес ртути, Н/м^3; h — разность уровней в левом и правом колене, м.

Если объем ртути не изменяется, то уровень ртути в любом колене также однозначно связан с величиной $p - p_0$. Уровень ртути в колене может быть измерен способом, который рассмотрен в § 4.3.

Такая схема измерения используется в уровнемере УДВ-1 [5] и уровнемере подземных вод. Выходной величиной является число импульсов, линейно связанное с уровнем воды.

При измерении разности давлений с помощью дифференциальных ртутных манометров также может быть использован метод уравновешивающего преобразования (рис. 4.12).

В левом неподвижном колене на поверхности ртути плавает шарик *1* из ферромагнитного материала, являющийся подвижным сердечником индуктивного дифференциального преобразователя *2*. Сигнал разбаланса подается на усилитель *3* и двигатель *4*, который, вращая микрометрический винт *5*, перемещает подвижное колено трубки *6* со ртутью. Равновесие всей системы будет иметь место, когда шарик займет нулевое положение, при этом разность

давлений $p - p_0$ будет уравновешена столбом h ртути в правом колене. Таким образом, каждому значению $p - p_0$ соответствует определенное значение h или угол поворота вала двигателя. Выходной величиной такого уровнемера является код Морзе (для оперативной информации судам) и телетайпный код (для регистрации уровня на перфоленте с последующим вводом в ЭЦВМ).

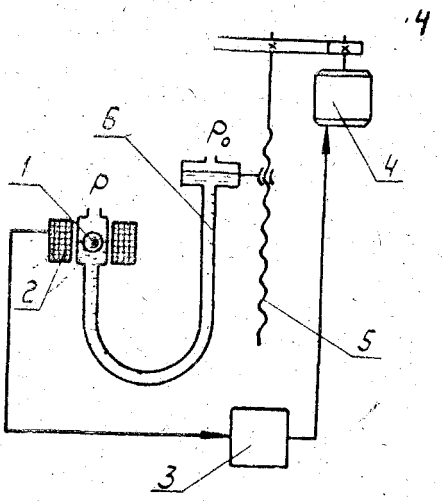


Рис. 4.12. Схема автоматического уравновешивания давления с помощью ртутного манометра.

Все гидростатические уровнемеры обладают тем преимуществом перед поплавковыми, что для их работы не требуется строительства колодцев, они могут работать в замерзающих водоемах, ветровое волнение поверхности не сказывается на работе уровнемера, если приемник давления находится на глубине, равной нескольким длинам волн.

Глава V

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ

§ 5.1. Классификация методов измерения глубины

Основные методы измерения глубины представлены на рис. 5.1.

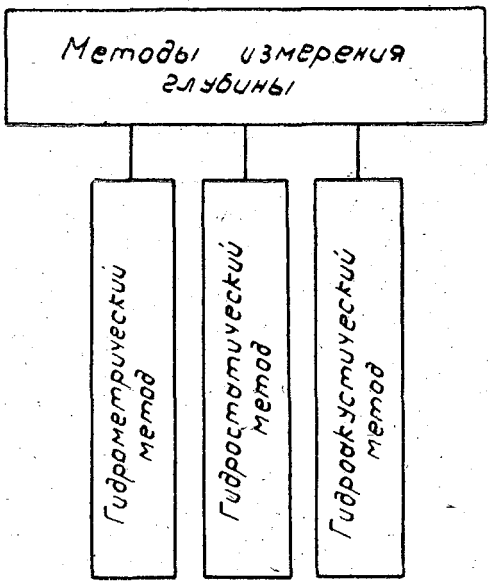


Рис. 5.1. Методы измерения глубины.

Гидрометрический метод основан на непосредственном измерении глубины различными механическими устройствами: наметка, ручной и механический лот. Этот метод и погрешности измерения глубины достаточно полно рассмотрены в курсе «Гидрометрия».

Гидростатический метод измерения глубины в настоящее время реализован в единственном приборе — гидростатическом про-

филографе, который с достаточной полнотой изложен, например в учебнике «Гидрометрия» В. Д. Быкова и А. В. Васильева. (Л., Гидрометеоиздат, 1972) и поэтому в данном курсе не рассматривается.

§ 5.2. Гидроакустический метод измерения глубины

При гидроакустическом методе измерения глубины используется зависимость между глубиной и временем прохождения ультразвуковых колебаний от излучателя до дна и от дна до приемника (рис. 5.2).

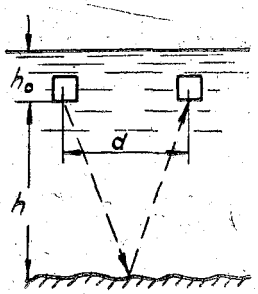


Рис. 5.2. Гидроакустический метод измерения глубины.

Дно водоема представляет собой довольно хорошую отражающую поверхность для ультразвуковых колебаний. Коэффициент отражения для сред вода—песок — 0,36 и вода—ил — 0,1. Коэффициент отражения сред вода—воздух составляет 0,999, поэтому поверхность воды является идеальной для работы гидроакустических уровнемеров.

В общем случае связь между глубиной h и временем t выражается формулой

$$(h-h_0)^2+\left[\frac{d+(v'_c+v'_т)t}{2}\right]^2=\frac{c^2t^2}{2}, \qquad (5.1)$$

где h_0 — заглубление вибраторов, м; d — расстояние между излучателем и приемником (база), м; v_c' и $v_т'$ — составляющие скорости судна и течения воды в направлении базы, м/с; c — скорость звука в воде, м/с.

Так как скорость звука в воде равна приблизительно 1500 м/с, а скорости v_c' и $v_т'$ не превосходят 5 м/с, кроме того, если излучатель и приемник совмещены (используются прямой и обратный магнитоупругий и пьезоэлектрический эффекты), то формула (5.1) значительно упрощается

$$h = \frac{c}{2} t + h_0. \qquad (5.2)$$

Основная погрешность измерения гидроакустическим методом зависит от непостоянства скорости звука в воде, главным образом, от температуры (в диапазоне температур от 0 до 30° С скорость звука изменяется на 6%), поэтому, если нет автоматического ввода поправки на температуру, необходима тарировка прибора перед началом промеров.

Другой составляющей погрешности является неточность определения времени t, зависящая от используемого метода измерения времени между двумя электрическими импульсами.

Волнение поверхности (качка промерного судна) неблагоприятно сказывается на точности измерения глубины.

В этом случае гидроакустические уровнемеры находятся в более выгодных условиях, так как они установлены неподвижно. Колебания уровня воды из-за волнения могут быть сглажены до сколь угодно малой величины, так как скорость изменения уровня в естественных водоемах мала (не более 2 см/мин).

При измерении же глубины большой коэффициент сглаживания может вызвать скоростную ошибку, так как глубины могут изменяться со значительно большими скоростями при большой скорости промерного судна (при уклоне дна 10° и скорости промерного судна 2,5 м/с скорость изменения глубины составляет 0,44 м/с, т. е. в 1320 раз больше).

На рис. 5.3 представлена блок-схема малогабаритного эхолота ЭПО-10. Эхолот ЭПО-10 позволяет измерять глубины от 0,5 до 10 м с точностью 5 см на пятиметровой шкале и 10 см на десятиметровой шкале. Напряжение источника питания 12 В. Потребляемая мощность 2 Вт. Масса эхолота с забортным устройством 8,8 кг. Наибольшая скорость судна при производстве промеров 10 км/ч при установке вибратора в забортном устройстве и 20 км/ч — при установке в шахте.

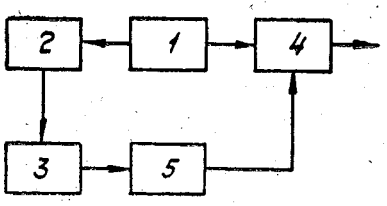


Рис. 5.3. Блок-схема малогабаритного эхолота „ЭПО-10“;

1—задающий генератор; *2*—возбудитель пьезоэлектрического вибратора; *3*—пьезоэлектрический вибратор; *4*—отсчетный триггер; *5*—резонансный усилитель.

Работой всего прибора управляет задающий генератор *1*, выполненный по схеме блокинг-генератора с частотой следования 73,15 Гц±0,5% (соответствует времени прохождения звука на глубину 10 м и обратно).

Импульс с задающего генератора *1* поступает на возбудитель *2* пьезоэлектрического вибратора *3*, создающего импульс ультразвуковых колебаний частоты 150 кГц, и на отсчетный триггер *4*, опрокидывая его в одно из устойчивых положений.

Ультразвуковые колебания, отразившись от дна и достигнув пьезоэлектрического вибратора, возбуждают в нем импульс электрического напряжения, частоты 150 кГц, усиливаемый трехкаскадным резонансным усилителем *5*. После детектирования и сглаживания импульс напряжения поступает на отсчетный триггер *4*, опрокидывая его в исходное положение. С момента появления очередного импульса от задающего генератора весь процесс повторяется сначала.

В качестве индикатора глубины используется магнитоэлектрический стрелочный прибор. Угол отклонения стрелки прибора пропорционален среднему значению тока, определяемому формулой

$$I_{ср} = \frac{2I_{max}}{cT}(h - h_0), \qquad (5.3)$$

где I_{max} — величина тока через прибор, когда триггер находится в опрокинутом положении, А; c — скорость распространения звука в воде, м/с; T — период следования ультразвуковых посылок $\left(T = \frac{1}{73{,}15}\text{ с}\right)$; h и h_0 — глубина и заглубление вибратора, м.

При постоянных значениях I_{max}, c и T угол отклонения стрелки прибора пропорционален измеряемой глубине, поэтому прибор имеет равномерную шкалу, проградуированную в пределах от 0 до 10 м.

Заметим, что такой прибор может измерять глубины большие, чем 10 м, например 19 м. На шкале прибора стрелка будет показывать при этом 9 м, так как опрокидывание триггера будет производиться предыдущим импульсом.

Принцип действия малогабаритного эхолота ТОР-5 мало чем отличается от рассмотренного.

Для стрелочных эхолотов более предпочтительным является частотный метод. При таком методе импульсы напряжения, подаваемые на возбудитель, поступают не от блокинг-генератора с постоянной частотой, а с выхода усилителя. В этом случае частота F посылки ультразвуковых импульсов будет зависеть от глубины

$$F = \frac{c}{h-h_0}. \qquad (5.4)$$

Если одновременно подавать импульсы на заторможенный мультивибратор, то через стрелочный прибор, подключенный к выходу мультивибратора, пойдет средний ток, равный

$$I_{ср} = I_{max}\,\tau\,\frac{c}{h-h_0}, \qquad (5.5)$$

где τ — длительность импульса, вырабатываемого мультивибратором, с.

Как видно из формулы (5.5), шкала прибора обратная, т. е. бо́льшим глубинам соответствует меньший ток, а малым — больший. Так как точность измерения тока выше в конце шкалы, то меньшие глубины будут измеряться с большей абсолютной точностью, а бо́льшие — с меньшей. Относительная погрешность измерения глубины будет оставаться приблизительно постоянной.

В эхолотах ПЭЛ-2, РЭЛ-3 и «Язь» производится регистрация глубины при промерах на специальной электротермической бумаге.

Блок-схема этих приборов изображена на рис. 5.4.

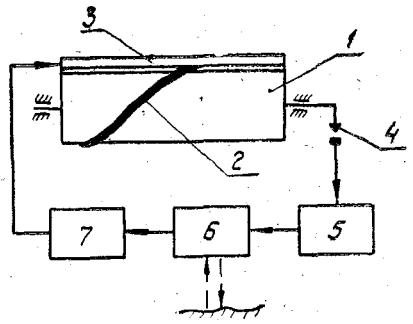


Рис. 5.4. Блок-схема эхолота с записью глубин на электротермической бумаге:

1—барабан; *2*—спираль; *3*—печатающая планка; *4*—посылочный контакт; *5*—ультразвуковой генератор; *6*—излучатель и приемник ультразвуковых колебаний; *7*—усилитель.

Работой эхолота управляет записывающее устройство, которое представляет собой барабан *1*, вращающийся с постоянной скоростью. На поверхности барабана находится проволока *2*, наполовину утопленная в специальную канавку, представляющую собой точную винтовую линию. К проволоке вдоль всей образующей ба-

рабана прижимается «печатающая» планка *3*. При любом положении барабана планка касается спирали только в одной точке. Если между планкой и спиралью поместить бумагу, предельно насыщенную углеродом и с лицевой стороны покрытую светло-серой пленкой, содержащей тиосульфат свинца и окись титана, то при приложении к планке импульса напряжения порядка 150—250 В светлая пленка в месте контакта сгорает, обнажая черную поверхность основного слоя. Таким образом, производится регистрация момента прихода отраженного и усиленного импульса.

Посылка импульса производится этим же барабаном, на оси которого укреплен контакт *4*, управляющий работой ультразвукового генератора *5*. Замыкание контакта происходит в тот момент, когда планка касается спирали у одного конца барабана. К моменту прихода отраженного импульса барабан успевает повернуться на некоторый угол, а точка соприкосновения планки со спиралью — сместиться на некоторую величину к противоположному концу барабана.

В зависимости от глубины погружения вибратора может регулироваться начало посылки ультразвукового импульса путем поворота контакта относительно барабана. Скорость вращения барабана постоянна и не регулируется, поэтому необходимо введение поправок перед началом промеров на изменение скорости распространения звука.

Малогабаритный эхолот «Язь» [1] не имеет барабана. Запись ведется вращающимся с постоянной скоростью пером (вольфрамовой проволочкой) в криволинейной системе координат. Способ регистрации на электротермической бумаге весьма нагляден, но очень не удобен, так как нуждается в последующей ручной камеральной обработке.

Вообще все результаты, даваемые существующими эхолотами, не могут быть использованы непосредственно для обработки ЭЦВМ. Другим весьма существенным недостатком существующих эхолотов является то, что они дают одну координату—глубину — и не дают информации о расстоянии до постоянного начала.

Скорость протяжки бумаги во всех эхолотах постоянна, поэтому горизонтальный масштаб записи зависит от скорости хода судна, которая должна выдерживаться равномерной и прямолинейной, что практически невозможно.

Для повышения точности определения координат промерных точек на эхограмме во всех случаях необходимо производить засечки (5—10 на всей длине промерного галса), что является неудобством при производстве промеров.

Поддержание постоянства горизонтального масштаба эхограммы может быть достигнуто, если скорость протягивания диаграммы синхронизовать со скоростью промерного судна, используя, например, эффект Допплера.

Более эффективным методом является гидроакустический метод измерения расстояния на поверхности воды. Так как отражение ультразвуковых колебаний от берега в этом случае невозможно, то для фиксации момента излучения (или приема) ультразвуковых колебаний должна использоваться радиосвязь. Этот метод более предпочтителен при производстве промеров в малых водоемах и водотоках нежели радиогеодезический, так как точность при этом может быть достигнута значительно выше (доли метра).

Таким образом, в настоящее время уже назрела необходимость создания гидрометрических гидроакустических приборов для измерения глубины и расстояний с выходом, допускающим непосредственный ввод в ЭЦВМ для определения таких параметров водных объектов, как площадь водного сечения, смоченный периметр, гидравлический радиус, средняя глубина и др.

Хотя гидроакустический метод совершенно неприемлем в водоемах с густой растительностью, однако число таких водоемов и их роль крайне невелики.

Глава VI

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ

§ 6.1. Классификация методов измерения скорости течения воды

Основные методы измерения скорости течения воды представлены на рис. 6.1.

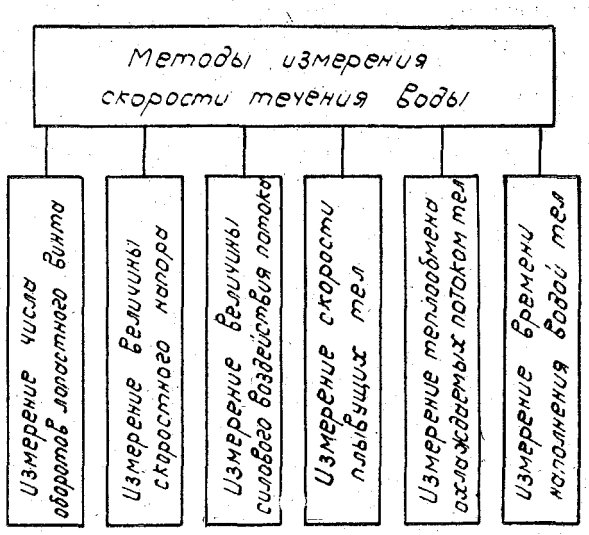


Рис. 6.1. Методы измерения скорости течения воды.

В настоящей главе рассматриваются только первые пять методов.

§ 6.2. Метод, основанный на фиксации числа оборотов лопастного винта

Этот метод весьма широко используется в гидрометрии для измерения скорости течения воды в естественных и искусственных водотоках с помощью гидрометрических вертушек.

Разработка малогабаритных вертушек с диаметром лопастей 10 мм и менее значительно расширила сферу их применения. Такие вертушки широко используются для измерения скоростей в лабораторных условиях и для измерения структуры потока (пульсации скоростей).

Характеристическое управление гидрометрической вертушки, как известно [1], имеет вид

$$v = an + \sqrt{bn^2 + c}, \tag{6.1}$$

где v — средняя скорость течения воды, м/с; n — средняя угловая скорость ротора вертушки, об/с; a, b и c — коэффициенты, характеризующие свойства вертушки.

Нетрудно видеть, что

$$c = v^2_0, \tag{6.2}$$

где v_0 — начальная скорость вертушки, зависящая от момента сухого трения на оси ротора вертушки и дебаланса ходовой части, м/с.

Коэффициент b характеризует момент вязкого трения ходовой части в воде.

При отсутствии всех видов трения уравнение вертушки было бы

$$v = an = K_г n, \tag{6.3}$$

где $K_г$ — геометрический шаг вертушки, $\frac{м}{об}$, следовательно,

$$a = K_г.$$

При $v \gg v_0$

$$v = (a + \sqrt{b})n = Kn, \tag{6.4}$$

где K — гидравлический шаг вертушки, $\frac{м}{об}$, отсюда

$$b = (K - K_г)^2.$$

Параметры v_0, $K_г$ и K определяются чаще всего экспериментально путем тарирования вертушек в бассейнах. Основными погрешностями измерения скорости течения воды с помощью вертушек являются погрешность измерения угловой скорости, температурная погрешность и старение (износ). При работе вертушки в пульсирующем потоке возникает дополнительная погрешность измерения средней скорости, зависящая от амплитуды и частоты пульсации.

В динамическом режиме вертушка описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка вида [2]

$$J\frac{d\omega}{dt}+b\omega^2+v_0^2=(v-K_г\omega)^2\,\mathrm{sign}\,(v-K_г\,\omega), \qquad (6.5)$$

где J — приведенный момент инерции ротора вертушки, $\frac{м^2}{с\cdot об}$; ω — мгновенная угловая скорость вертушки, $\frac{об}{с}$; $\mathrm{sign}\,(v-K_г\,\omega)$ — символ, равный $+1$, если $v>K_г\,\omega$ и -1, если $v<K_г\omega$.

В отличие от апериодического звена первого порядка, среднее значение которого не зависит от амплитуды пульсации входной величины, среднее значение угловой скорости вертушки увеличивается с увеличением частоты и амплитуды пульсации скорости потока. Относительное завышение средней скорости при увеличении частоты пульсации стремится к величине

$$\frac{\sqrt{b}\,\Delta v^2}{2\sqrt{b}\,v^{0\,2}-Kv_0^2}\simeq\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta v}{v^0}\right)^2 \qquad (6.6)$$

при $v^0 \gg v_0$,

где v^0 — средняя скорость пульсирующего потока, м/с; Δv — амплитуда пульсации, м/с.

С повышением частоты пульсации вследствие момента инерции вертушки возникают динамические погрешности в измерении мгновенной скорости потока. Таким образом, с повышением частоты возникают погрешности в измерении и средней скорости и амплитуды пульсации.

Частотный диапазон вертушек ограничен сверху величиной

$$f_{max}\simeq\frac{\sqrt{b}\,v^0}{\pi J\sqrt{48}}\,\text{Гц}. \qquad (6.7)$$

Для вертушки Ж-3 при скорости 1 м/с частота $f_{max}=0{,}7$ Гц. Приведенный момент инерции ходовой части вертушки J при одной и той же конфигурации ее ротора пропорционален плотности материала ротора и второй степени ее диаметра.

Величина $\sqrt{b}$ прямо пропорциональна диаметру ротора. Следовательно, частотный диапазон обратно пропорционален его диаметру. Для вертушки Х-6, имеющей диаметр около 10 мм, частотный диапазон расширяется приблизительно в 12 раз, достигая $8\div9$ Гц.

Регистрация числа оборотов микровертушек производится чаще всего с помощью электролитических преобразователей (реже индукционных). На рис. 6.2 представлены три различных способа регистрации числа оборотов микровертушек [3].

На рис. 6.2,*а* при вращении ротора вертушки и скрепленного с ней постоянного магнита индуктируется э.д.с. в катушке *L*. Недостатком является сложность конструкции и зависимость величины э.д.с. от скорости вращения.

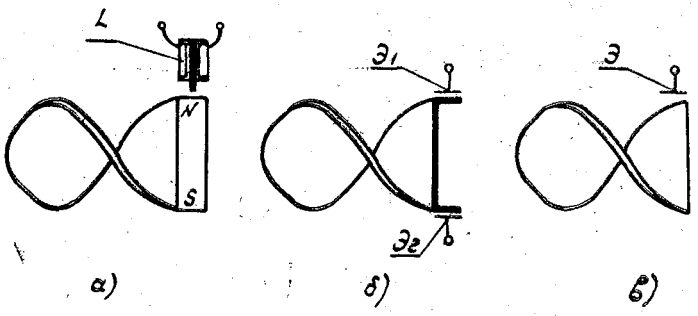


Рис. 6.2. Способы регистрации числа оборотов микровертушек: индукционный (*а*), электролитический двухэлектродный (*б*) и электролитический одноэлектродный (*в*).

На рис. 6.2,*б* к лопасти крепится пластинка из проводящего материала.

При вращении ротора изменяется проводимость воды между электродами $Э_1$ и $Э_2$. При повороте на 1 оборот во внешней цепи возникает два импульса тока.

На рис. 6.2,*в* имеется только один электрод $Э_1$. Лопасть, изготавливаемая чаще всего из электроизоляционного материала, при своем вращении изменяет электрическое поле электрода. Во внешней цепи также возникают 2 импульса тока за один оборот ротора вертушки.

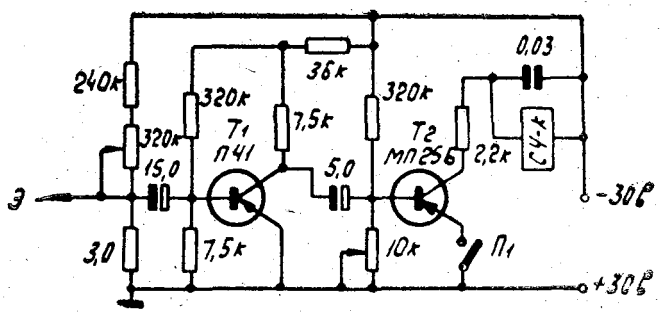


Рис. 6.3. Схема регистратора числа оборотов микровертушек с электромеханическим счетчиком.

На рис. 6.3 изображена принципиальная электрическая схема усилителя с выходом на электромеханические счетчики типов МЭС-54, СБ1-50 [3]. Включение и выключение счетчика производится выключателем $П_1$ по секундомеру. Усилитель работает с вертушкой, изображенной на рис. 6.2,*в*.

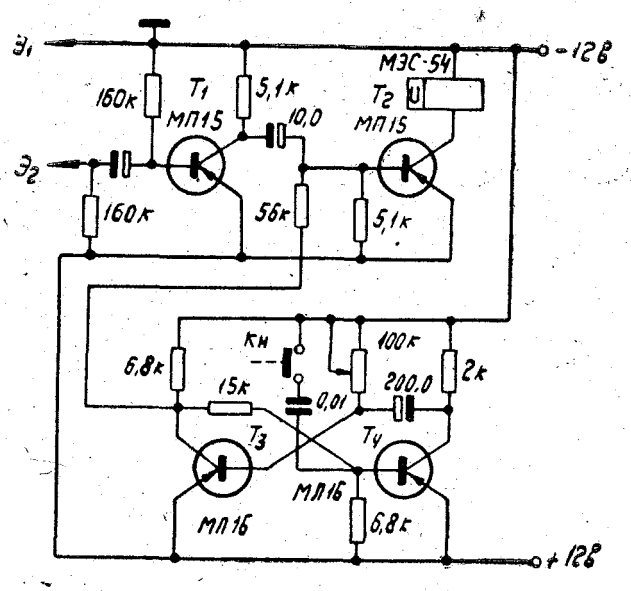


Рис. 6.4. Схема для получения в цифровом виде результата измерения скорости течения воды с помощью микровертушек.

На рис. 6.4 представлена схема усилителя, работающего с вертушкой Х-6 (рис. 6.2,*б*). Схема имеет в своем составе реле времени, выполненное на триодах T_3 и T_4, поэтому при определенной величине времени измерения результат может быть получен непосредственно в единицах скорости без использования свидетельства о тарировке вертушки.

По этому же принципу может быть создана схема для измерения скорости течения воды обычной гидрометрической вертушкой типа Ж-3, ГР-21. Чтобы результат измерения был выражен числом N, равным скорости течения в см/с, а время измерения было около 100 с, на контактной шестерне вертушки необходимо установить не 1, а 5 контактных штифтов.

На рис. 6.5 представлена принципиальная схема такого устройства.

При нажатии на кнопку $K_н$ открывается триод T_1 и срабатывает реле РЭС-6, которое одной парой своих контактов K_1 блокирует кнопку $K_н$, а второй — замыкает цепь, содержащую счетчик МЭС-54 и контакты вертушки.

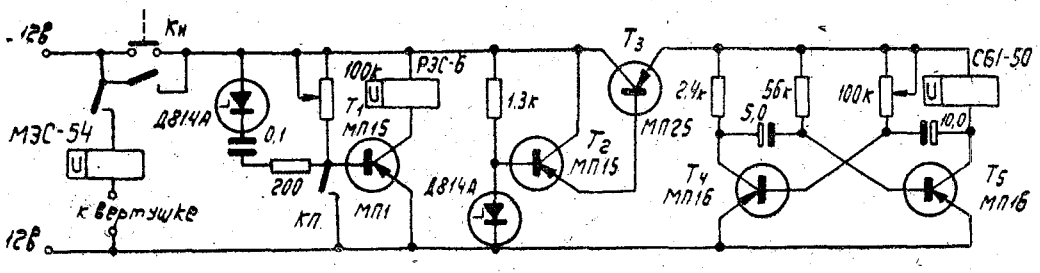


Рис. 6.5. Схема для получения в цифровом виде результата измерения скорости течения воды с помощью гидрометрической вертушки типа Ж-3.

Одновременно начинает работать мультивибратор на триодах T_3 и T_4. В течение каждого периода (около 1 с) колебаний мультивибратора срабатывает электромеханический счетчик СБ1-50. После 100 периодов колебаний мультивибратора стрелка счетчика делает полный оборот и замыкает контакт *КП*, который запирает триод T_1 и отключает всю схему от источника питания.

Для сохранения точности работы реле времени схема содержит электронный стабилизатор напряжения на триодах T_2 и T_3.

Точность работы прибора сохраняется при уменьшении напряжения питания до 8 В. Если напряжение питания меньше 8 В, то реле РЭС-6 не срабатывает, и прибор не работает, что является сигналом для смены батарей (3 батареи от карманного фонаря).

В литературе [4] имеется много схем, в которых частота импульсов преобразуется в ток, который измеряется стрелочным прибором, что в некоторых случаях является более удобным, например при записи скорости течения воды на электронном потенциометре типа ЭПП-09 при исследовании неустановившихся потоков.

Метод измерения скорости течения воды, основанный на фиксации числа оборотов ротора вертушки, характеризуется довольно высокой точностью измерения (1—2%) и широким диапазоном скоростей (до 3—5 м/с). Порог чувствительности всех вертушек равен 0,03—0,06 м/с и мало зависит от конструкции и размеров лопастей, так как с уменьшением размеров вертушки одновременно уменьшается и момент трения и вращающий (полезный) момент.

§ 6.3. Метод, основанный на фиксации скоростного напора

Этот метод измерения скорости потока реализуется с помощью гидрометрических трубок (Пито, Дарси). Высота подъема воды в трубке связана со скоростью v воды зависимостью

$$h = \frac{k}{2g} v^2, \tag{6.8}$$

где k — коэффициент, учитывающий конфигурацию приемной части трубки и физические свойства воды.

Для удобства работы с трубкой она имеет два приемных отверстия: динамическое и статическое, поэтому для этого случая в формуле (6.8) величина h — разность уровней в статической и динамической трубках.

Разность давлений может быть измерена визуально по шкале, однако лучшие результаты могут быть получены при использовании электрических методов измерения давления.

При этом в поток вводится только гидрометрическая трубка, а вся электронная аппаратура располагается на поверхности воды. На рис. 6.6 представлена одна из возможных схем измерения перепадов давления. Резиновая диафрагма *1* делит внутреннюю полость корпуса *2* датчика на два отсека, соединяемых трубками *3* и *4* с приемными отверстиями гидрометрической трубки. Трубки *5* и *6*, идущие к насосу, служат для заполнения внутреннего объема датчика водой.

Диафрагма в центре имеет два ферритовых кольца *7* и *8*, являющихся подвижным сердечником дифференциального индуктивного преобразователя *9*. Такая схема обладает высокой чувствительностью (порог чувствительности около 0,01—0,02 м/с), но шкала прибора нелинейная из-за нелинейной зависимости прогиба диафрагмы от скорости. Диапазон измерения скорости ограничен величиной 0,5—1,0 м/с (для больших скоростей необходима более жесткая диафрагма).

Значительно лучше результаты могут быть достигнуты при использовании метода уравновешивающего преобразования. На рис. 6.7 представлена блок-схема такого прибора.

Прогиб мембраны *1* вызывает изменение индуктивности преобразователя *2* и изменение частоты генератора *3*. Изменение частоты генератора преобразуется в напряжение с помощью частотного детектора *4*, затем усиливается усилителем постоянного тока *5* и подается на тянущий электромагнит *6*.

Так как сила притяжения электромагнита пропорциональна квадрату тока I (или напряжения), то ток (напряжение) оказывается пропорциональным скорости течения воды. Благодаря это-

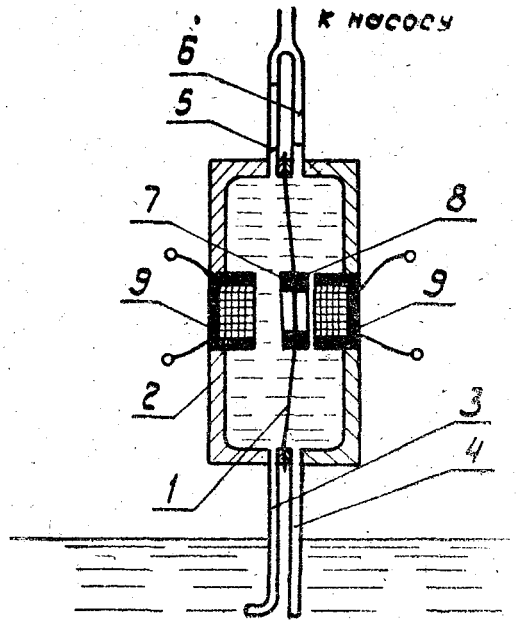


Рис. 6.6. Индуктивный дифференциальный манометр для гидрометрической трубки:
1 — резиновая диафрагма; *2* — корпус; *3* — динамическая трубка; *4* — статическая трубка; *5* и *6* — трубки, идущие к насосу; *7* и *8* — ферритовые кольца; *9* — индуктивный дифференциальный преобразователь.

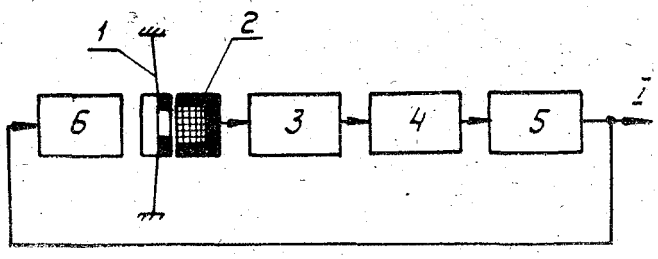


Рис. 6.7. Блок-схема дифференциального манометра, работающего по методу уравновешивающего преобразования, для гидрометрической трубки:
1 — резиновая диафрагма; *2* — индуктивный преобразователь; *3* — измерительный генератор; *4* — частотный детектор; *5* — усилитель; *6* — тянущий электромагнит.

му шкала прибора является равномерной в широком диапазон изменения скорости.

Быстродействие такого прибора много выше, чем предыдущего Обе схемы прибора облегчают работу с гидрометрической труб кой, кроме того, они дают возможность производить автоматиче скую регистрацию скорости, что особенно важно при исследовани неустановившихся процессов.

§ 6.4. Метод, основанный на фиксации величины силового воздействия потока

В основе этого метода лежит зависимость

$$F = C_x \frac{1}{2} \rho \omega v^2, \qquad (6.9$$

где F — усилие, испытываемое телом, находящимся в потоке, Н

C_x — безразмерный коэффициент сопротивления, завися щий от формы тела и числа Рейнольдса (Re); ρ — плот ность воды, $\frac{кг}{м^3}$; ω — площадь проекции тела, нормаль ная направлению скорости, $м^2$.

Как видно из формулы (6.9), сила F пропорциональна квадра ту скорости потока.

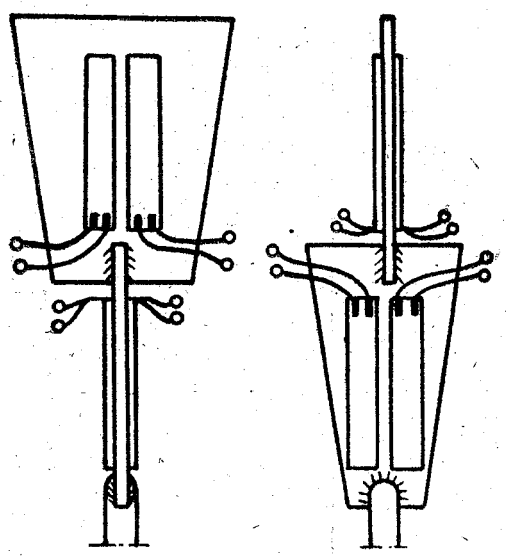


Рис. 6.8. Упругий элемент двухкомпонентного тензометрического измерителя пульсаций скорости потока.

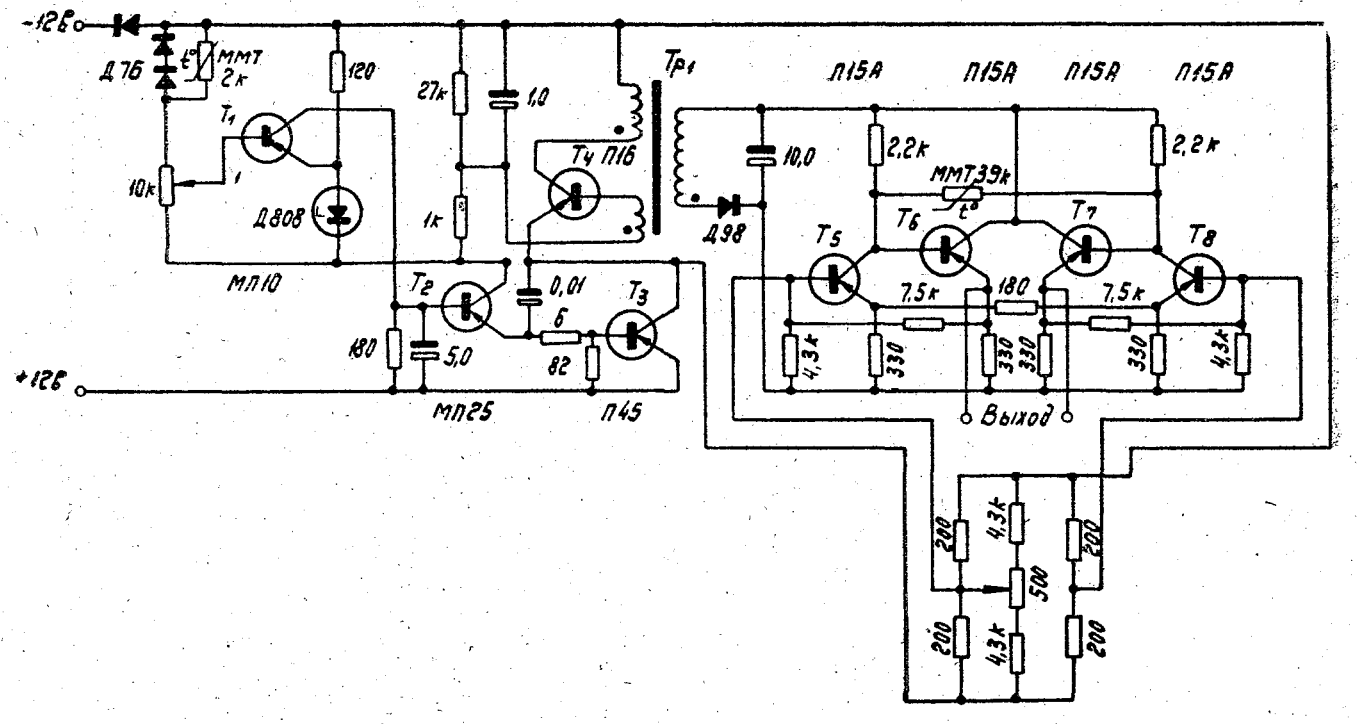


Рис. 6.9. Электрическая схема усилителя тензометрического измерителя пульсаций скорости потока.

Этот метод измерения благодаря высокому быстродействию нашел преимущественное применение для измерения макропульсаций скоростей в лабораторных условиях, так как при измерении средней скорости у этого метода нет никаких преимуществ по сравнению с предыдущим.

Принципиальная схема прибора, работающего по этому методу, детально рассматривалась в § 1.17. Использование упругого элемента, изображенного на рис. 6.8, позволяет измерять две составляющие скорости пульсаций. Упругий элемент, изображенный на рис. 6.8, представляет собой составную балку с нанесенными на нее с двух сторон тензопреобразователями (8 штук).

Усилия деформируют верхнюю и нижнюю часть балки. Чтобы деформации верхней и нижней частей балки при одном и том же усилии были одинаковыми, балка выполнена равного сопротивления. На рис. 6.9 представлена схема одного канала (другой аналогичен) двухканального полупроводникового усилителя для работы с таким измерителем скорости.

Для гальванического разделения цепей питания и входа дифференциального двухкаскадного усилителя постоянного тока, выполненного на транзисторах T_5, T_6, T_7 и T_8, он питается от преобразователя постоянного напряжения (транзистор T_4).

Транзисторы T_1, T_2 и T_3 образуют стабилизатор напряжения компенсационного типа для питания всех цепей усилителя и измерительного моста.

К выходу усилителя подключается светолучевой осциллограф Н-700.

Погрешность измерения скорости может быть достигнута порядка 5—7% в диапазоне скоростей от 0,1 м/с до 2 м/с. Несколько большая чувствительность может быть достигнута с использованием индуктивных преобразователей вместо тензосопротивлений.

§ 6.5. Метод, основанный на фиксации скорости плывущего тела

Этот метод измерения скорости весьма распространен в гидрометрии и имеет чрезвычайно разнообразные способы реализации. В основе этого метода лежит зависимость

$$v = \frac{L}{t}, \tag{6.10}$$

где v — скорость течения воды, м/с; L — известное расстояние (база), м; t — время прохождения базы L, с.

Иногда этот метод называется методом «меток». Под методом меток потока в настоящее время понимают создание и использование отдельных образований в потоке с физическими свойствами, отличными от потока, по скорости перемещения которых

вместе с потоком судят о его скорости. Возможно разделение приборов, использующих этот метод, на приборы с нерегулярным образованием меток, а также приборы с равномерными распределенными метками в потоке. Первые работают по временному принципу, а вторые — по частотному.

Метками в потоке воды могут являться твердые тела, цветовые, световые (люминесцентные), солевые, тепловые или радиоактивные образования. Способ регистрации меток зависит от их физических свойств [4].

Из формулы (9.10) можно найти выражение для относительной погрешности

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta t}{t}. \qquad (6.11)$$

В погрешность ΔL входит погрешность определения базы и турбулентное расстояние (дисперсия) метки, за исключением случая, когда меткой является твердое тело. Величина Δt зависит от погрешности измерения времени движения метки и от продолжительности ввода метки в поток.

Следовательно, с увеличением базы L и времени наблюдения t точность измерения скорости повышается, однако при этом измеряется не местная, а средняя скорость потока на длине базы. Кроме того, при увеличении базы метка может быть настолько «размыта», что для измерения скорости приходится прибегать к графоаналитическому методу измерения скоростей (см. § 7.2, формулы (7.10) и (7.11)).

В естественных водотоках чаще всего используются поверхностные и глубинные поплавки различных конструкций. Фиксация положения поплавков производится геодезическими методами или с помощью аэрофотосъемки.

В лабораторных условиях находит широкое применение киносъемка, позволяющая вести исследование поля скоростей потока, так как ведется одновременное наблюдение за большим количеством частиц, распределенных в потоке.

В обоих случаях необходима кропотливая обработка фото и киноснимков для определения модуля и вектора скоростей поля потока. Однако такой метод измерения в некоторых случаях является единственно возможным.

Для измерения скоростей течения воды в сильно заросших руслах и в грунтах, а также скоростей движения талой воды по склону и в других случаях с большим успехом используются радиоактивные изотопы. На рис. 6.10 изображена принципиальная электрическая схема радиометра ДС-1С, разработанного А. М. Димаксяном [5].

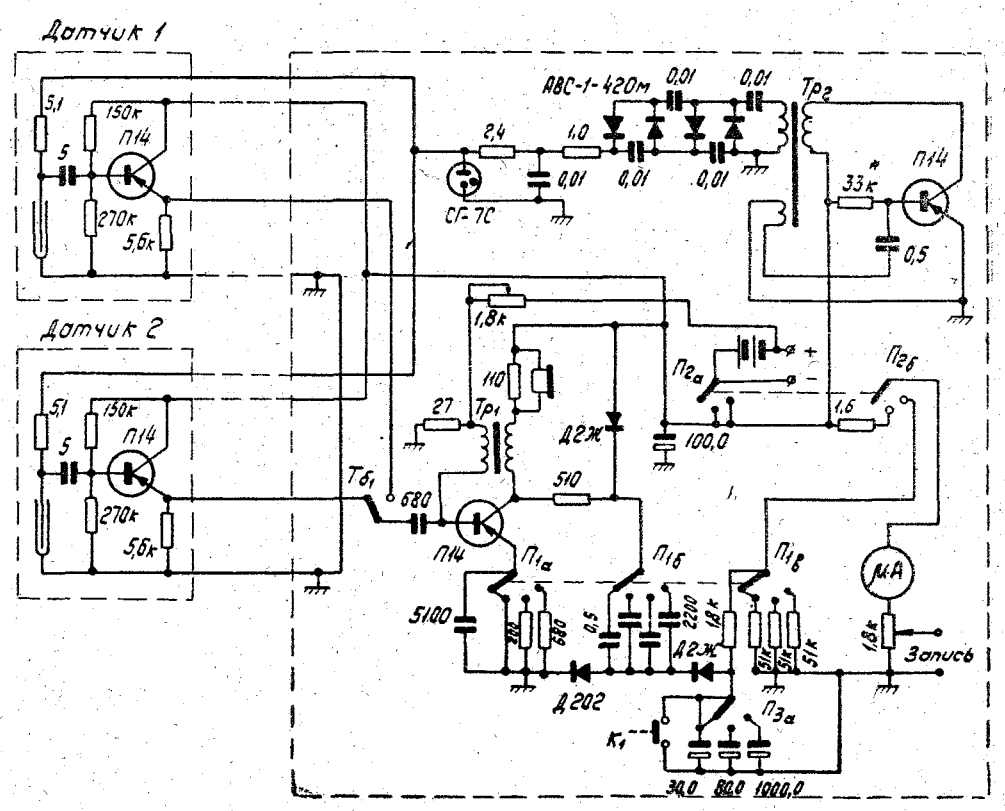


Рис. 6.10. Принципиальная электрическая схема радиометра ДС-1С для измерения скорости течения воды радиоактивным методом.

Радиометр состоит из двух датчиков *1* и *2*, состоящих из газоразрядных счетчиков СТС-6 и эмиттерных повторителей на триодах T_3 и T_4, блокинг-генератора (T_1, T_{p1}), преобразователя напряжений с 12 В на 400 В (T_2, T_{p2}) и измерителя скорости счета, состоящего из дозирующих емкостей, интегрирующей цепочки и микроамперметра.

Импульсы напряжения с датчиков поступают на блокинг-генератор, запуская его. Длительность импульсов может регулироваться дозирующими емкостями (C_{12} — C_{15}). Заряд с этих конденсаторов передается через диод $Д_2$ в интегрирующую цепочку (C_{16} — — C_{18}, R_{19} — R_{22}) с микроамперметром на выходе. Постоянная времени изменяется переключателем $П_3$. Переключатель $П_2$ изменяет род работы: «выключено», «режим», «измерение».

§ 6.6. Метод, основанный на принципе теплообмена

Этот метод измерения скорости потока в настоящее время используется, главным образом, для исследования мелкомасштабных турбулентных характеристик потоков жидкости (корреляционных функций пульсации скорости, пространственных и временных коэффициентов корреляции скорости, коэффициентов перемежаемости и т. п.) [6]. Приборы, работающие по этому методу, называются термоанемометрами (термогидрометрами).

При исследованиях применяются термоанемометры с проволочными и пленочными чувствительными элементами. Материалом для изготовления чувствительных элементов служит платиновая или вольфрамовая золоченая проволока диаметром от единиц до десятков микрон. Выбор размеров и конструкции определяется структурой исследуемого потока. На рис. 6.11 приведена конструкция проволочного чувствительного элемента с нитью диаметром $d = 5$ мкм и длиной 1 мм (отношение $l/d = 200$).

Выполнение такого условия является необходимым, чтобы можно было пренебречь влиянием креплений проволоки; с точки зрения тепловых потерь.

На рис. 6.11,*б* приведена одна из конструкций пленочного чувствительного элемента термоанемометра. Рабочая часть его представляет собой узкий клин из термостойкого стекла, на острие которого нанесена платиновая пленка толщиной до 1 мкм. Для измерений в пограничном слое применяются пленки, нанесенные на стеклянные пластинки, которые заделываются в стенки моделей.

Пленочные чувствительные элементы более устойчивы при механических нагрузках, которые имеют место при исследованиях в потоках воды, хотя и более инерционны.

Связь между электрическими параметрами нагретой нити и скоростью потока воды, в которую она помещена, количественно

устанавливается на основании баланса тепла нити. Это уравнение в случае потока жидкости постоянной температуры может быть записано в виде

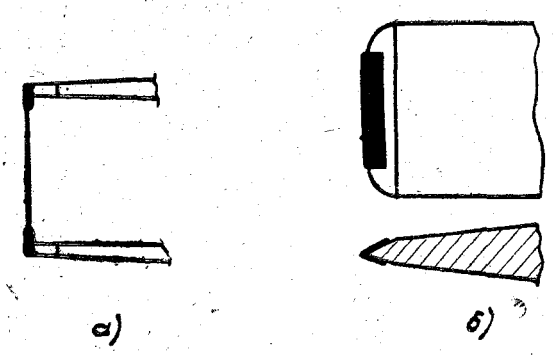


Рис. 6.11. Схемы проволочного (*а*) и пленочного (*б*) чувствительных элементов термогидрометров.

$$I^2R_w=(R_w-R_q)(A+B\sqrt{v})+\frac{c_w}{\alpha R_0}\frac{dR_w}{\alpha t}, \qquad (6.12)$$

где I — ток, текущий через нить, А; R_w — сопротивление нагретой нити, Ом; R_g — сопротивление нити при температуре потока, Ом; R_0 — сопротивление нити при нулевой температуре, Ом; v — скорость потока жидкости, м/с; α — температурный коэффициент сопротивления нити, $\frac{1}{\text{град}}$; c_w — теплоемкость всей нити, $\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$; t — время, с; A и B — параметры, зависящие от физических свойств нити и среды.

Левая часть уравнения соответствует выделившемуся в нити теплу, правая часть — потерям тепла на охлаждение нити потоком и изменению теплосодержания нити.

Погрешность измерения этого метода зависит, главным образом, от температуры воды, влияющей как на смещение нуля прибора, так и на изменение чувствительности («сползание характеристики»). Нестабильность характеристики вызывается также появлением различных пленок на поверхности нити при ее нагреве.

При измерении пульсаций скорости используются два различных метода: метод постоянного тока и метод постоянной температуры нити.

В первом методе ток, текущий через нить, поддерживается постоянным, независимо от ее сопротивления. Изменения скорости

потока в этом случае связаны с изменением температуры нити, а следовательно, и ее сопротивления.

При медленных изменениях скорости потока температура нити изменяется также медленно, и количество тепла, идущего на изменение теплосодержания нити, невелико; поэтому последним слагаемым в уравнении (6.12) можно пренебречь. Тогда скорость потока будет однозначно связана с сопротивлением нити.

При быстрых изменениях скорости потока (турбулентной пульсации) пренебрегать последним членом нельзя. Однако, если

$$v = v^0 + \Delta v,$$

где v^0 — средняя скорость потока; Δv — амплитуда пульсации скорости, причем $\Delta v \ll v^0$, то можно произвести линеаризацию уравнения (6.12).

Линеаризованное уравнение имеет вид

$$\frac{c_w(R_0 - R_g)}{\alpha R_0 I^2 R_g} \frac{dr_w}{dt} + 2w = -B \frac{R_0 - R_g}{2I^2 R_g \sqrt{v}} \Delta v, \qquad (6.13)$$

где r_w — изменение сопротивления относительно среднего значения, Ом.

Постоянная времени нити

$$T = \frac{c_w(R_0 - R_g)}{\alpha R_0 I^2 R_g} \text{ с} \qquad (6.14)$$

такова, что позволяет измерять частоты пульсаций до 300 Гц непосредственно, не прибегая к частотной коррекции усилителя.

Схема прибора, работающего по этому методу, несложна и проста в обращении.

Выходной величиной является напряжение разбаланса моста, усиливаемого при необходимости усилителем.

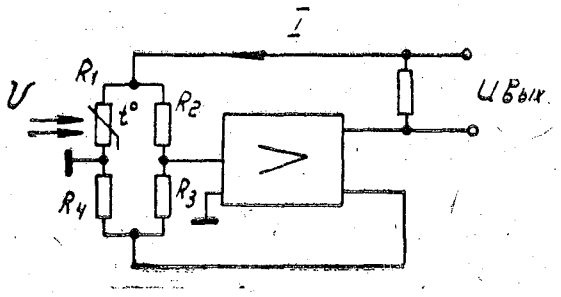


Рис. 6.12. Схема измерения пульсаций скорости потока с постоянной температурой нити.

При втором методе температура нити, а следовательно, и ее сопротивление поддерживаются постоянными. Практически это осуществляется путем применения усилителей, охваченных обратной связью (рис. 6.12). Нить включается в одно из плеч моста, который питается током с выхода усилителя. На вход усилителя подается напряжение разбаланса моста. Усилитель мгновенно изменяет ток, подогревающий нить, как только появляется малейшее отклонение температуры вследствие изменения скорости потока. Анализ [6] показывает, что постоянная времени нити термоанемометра с обратной связью во много раз меньше, чем без обратной связи, а частотный диапазон достигает нескольких десятков кГц.

Для повышения чувствительности в десятки и сотни раз применяют датчики косвенного подогрева. Использование полупроводниковых термосопротивлений еще более увеличивает чувствительность измерительной аппаратуры.

Глава VII

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ

§ 7.1. Классификация методов измерения расхода воды

Основные методы измерения расхода воды в открытых и закрытых (напорных) водотоках представлен на рис. 7.1.

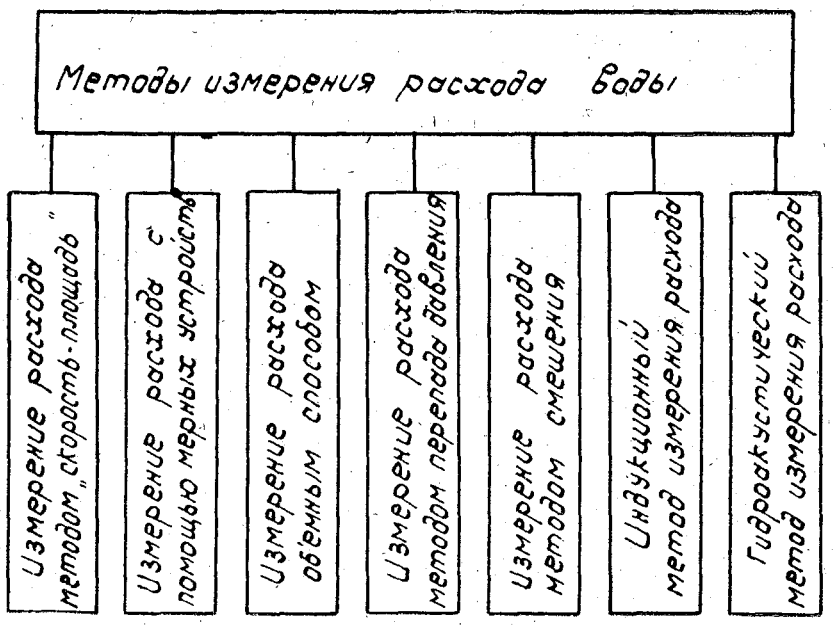


Рис. 7.1. Методы измерения расхода воды.

В настоящей главе рассматриваются только три последних метода измерения расхода.

§ 7.2. Измерение расхода методом смешения

Этот метод измерения расхода является разновидностью метода «метод», рассмотренного в гл. VI. В этом случае «метка» создается не в одной точке, а по всему сечению.

Если расход Q по длине водотока не изменяется, то не меняется и количество введенного в поток индикатора (такой случай встречается в практике довольно часто).

Если индикатор равномерно перемешан по сечению, то для любого сечения можно написать [1]

$$\frac{dS}{S} = \frac{dn}{N}, \tag{7.1}$$

где S и N — соответственно сечение водотока и общее количество отмечающих поток элементов, образующих метку;
dn — число отмечающих элементов, приходящихся на элемент сечения dS трубопровода.

Для регистратора, находящегося на расстоянии L от места ввода метки и регистрирующего каждый элемент метки, можно написать

$$dn = F(t)\,dt \tag{7.2}$$

и

$$N = \int_0^\infty F(t)\,dt, \tag{7.3}$$

где $F(t)$ — функция показаний регистратора меток, записываемая на диаграмме.

С учетом (7.1)

$$dS = S\,\frac{F(t)\,dt}{\int_0^\infty F(t)\,dt}. \tag{7.4}$$

Элементарный и общий расходы при $v_{ср} = L/t$ будут равны

$$dQ = SL\,\frac{\frac{F(t)}{t}\,dt}{\int_0^\infty F(t)\,dt}; \tag{7.5}$$

$$Q = SL\frac{\int\limits_0^\infty \frac{F(t)}{t}\,dt}{\int\limits_0^\infty F(t)\,dt}. \qquad (7.6)$$

Отсюда, в частности, может быть найдена средняя скорость по сечению водотока

$$v_{ср} = L\frac{\int\limits_0^\infty \frac{F(t)}{t}\,dt}{\int\limits_0^\infty F(t)\,dt}. \qquad (7.7)$$

В расходомерах с двумя регистраторами меток их сигналы описываются двумя функциями $F_а(t)$ и $F_б(t)$, и время прохождения отдельных элементов метки можно записать в виде следующей функции $(t_а - t_б) = \varphi(t)$ (рис. 7.2), а скорость при расстоянии l между регистраторами —

$$v = \frac{l}{\varphi(t)}.$$

В этом случае элементарный расход и средняя скорость будут равны

$$dQ = l\cdot S\frac{\frac{F_а(t)}{\varphi(t)}}{\int\limits_0^\infty F_а(t)dt} \qquad (7.8)$$

и

$$v_{ср} = \frac{l}{\int\limits_0^\infty F_а(t)\,dt}\int\limits_0^\infty \frac{F_а(t)}{\varphi(t)}\,dt. \qquad (7.9)$$

Для решения приведенных выражений необходимо знание функций $F_а(t)$ и $\varphi(t)$, которые могут быть найдены из диаграмм прохождения меток около регистраторов. Поэтому не представляет трудностей графоаналитическое решение полученных выражений:

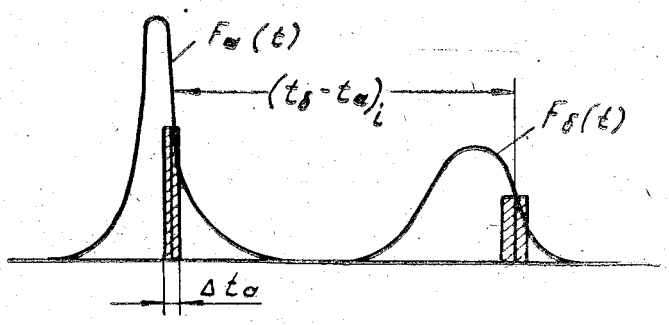


Рис. 7.2. Временные диаграммы, полученные двумя регистраторами, находящимися на известном расстоянии друг от друга по течению.

$$v_{ср} = L \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{F(t_i)}{t_t} \Delta t}{\sum_{i=1}^{m} F(t_i) \Delta t} \tag{7.10}$$

и

$$v_{ср} = l \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{F_а(t_i)}{(t_б - t_а)} \Delta t_а}{\sum_{i=1}^{m} F_а(t_i) \Delta t_а}, \tag{7.11}$$

где $\Delta t_а$ — элемент разбиения времени прохождения метки.

Благодаря использованию этих формул существенно повышается точность измерения расхода.

В случаях, когда высокая турбулентность потока препятствует применению способа разового смешения, более рациональным способом является способ непрерывного смешения. В этом случае некоторое количество q индикатора непрерывно вводится в поток, расход Q которого хотят измерить. В любом месте ниже по течению (при условии полного перемешивания индикатора) отбираются пробы и измеряется концентрация индикатора в этой пробе. Расход измеряется по формуле

$$Q = q \frac{(C_2 - C_1)}{C_1 - C_0}, \tag{7.12}$$

где C_0 — концентрация индикатора в основном потоке перед смешением; C_1 — концентрация индикатора в пробе; C_2 — концентрация вводимого индикатора.

Очень часто $C_0 \ll C_1$, а $C_1 \ll C_2$. Тогда

$$Q = \frac{C_2}{C_1} q. \qquad (7.13)$$

В гидрометрии этот метод используется в хорошо известных электролитических измерителях расходов воды (ЭИРВ) ГР-54.

§ 7.3. Индукционный метод измерения расхода

В основе этого метода лежит закон электромагнитной индукции: в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуктируется эдс., пропорциональная индукции и скорости перемещения проводника. При этом направление эдс. перпендикулярно направлению движения проводника и направлению магнитного поля.

Если заменить проводник потоком проводящей жидкости *1*, текущей между полюсами магнита *2* (рис. 7.3), и измерять эдс., на-

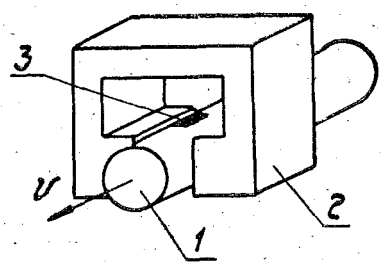


Рис. 7.3. Схема индукционного расходомера:
1 — труба; *2* — постоянный магнит; *3* — электрод.

веденную в жидкости, то разность потенциалов e на электродах *3* будет равна [2]

$$e = -kBDv_{ср}. \qquad (7.14)$$

где k — безразмерный коэффициент, зависящий от вида магнитного поля; B — индукция между полюсами магнита, $\frac{Вб}{м^2}$, D — диаметр трубы, м; $v_{ср}$ — средняя по сечению скорость течения воды, м/с.

Индукционные расходомеры могут быть выполнены как с постоянными магнитами, так и с электромагнитами, питаемыми переменным током.

Так как величина эдс невелика (порядка 10 мВ), то погрешность измерения расхода в обоих случаях составляет 1,5—2,5%.

Индукционными расходомерами можно производить измерения как в трубах, так и в открытых водотоках. Диаметр трубопровода может быть от нескольких мм до 1,5 ÷ 2 м, а расход — от $3 \cdot 10^{-8}$ до 3 м³/с.

Индукционные расходомеры практически безынерционны и позволяют производить измерения в быстропеременных потоках.

Необходимым требованием является, чтобы удельное сопротивление воды не превышало 10^3—10^5 Ом · м.

§ 7.4. Гидроакустический метод измерения расхода воды

В основе этого метода лежит зависимость абсолютной скорости распространения звуковых (чаще ультразвуковых) колебаний при наличии переносной скорости воды [3]. Промежутки времени (t_1 и t_2) прохождения расстояния L в прямом и обратном направлениях равны

$$t_1 = \frac{L}{c + v_{ср}} \text{ и } t_2 = \frac{L}{C - v_{ср}}, \tag{7.15}$$

где c — скорость распространения звука в воде (около 1500 м/с);
$v_{ср}$ — средняя по сечению скорость течения воды, м/с.

Разность времени

$$t_2 - t_1 = \frac{2Lv_{ср}}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v_{ср}^2}{c^2}}. \tag{7.16}$$

Так как $v \leqslant 5$ м/с, то $\frac{v^2}{c^2} \simeq 10^{-5}$ и

$$t_2 - t_1 \simeq \frac{2Lv_{ср}}{c^2}. \tag{7.17}$$

В трубах (и руслах) расстояние L между источниками и приемниками звука — база — располагается под некоторым углом $\alpha \simeq 45°$ к вектору средней скорости (рис. 7.4), поэтому формула (7.17) будет иметь вид

$$t_2 - t_1 = \frac{2Lv_{ср}\cos\alpha}{c^2}. \tag{7.18}$$

Иногда используются частотные гидроакустические измерительные устройства.

Частоты прохождения импульсов от излучателя к приемнику в прямом и обратном направлениях равны

$$F_1 = \frac{c + v_{ср} \cos \alpha}{L} \text{ и } F_2 = \frac{c - v_{ср} \cos \alpha}{L}. \qquad (7.19)$$

Разность частот не содержит скорости c

$$\Delta F = F_1 - F_2 = 2 \frac{v_{ср}}{L} \cos \alpha, \qquad (7.20)$$

что является большим преимуществом этого способа.

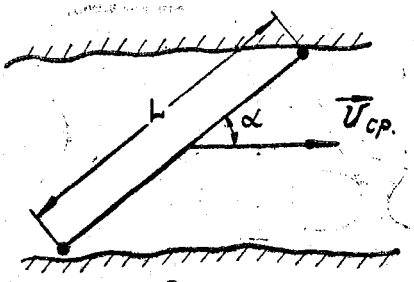


Рис. 7.4. Гидроакустический метод измерения средней скорости течения воды в водотоке.

Промежутки времени и частоты, как известно, легко измеряются в цифровом виде с большой степенью точности. Если частоту F_1 или F_2 подавать на вход цифрового частотомера, а величиной ΔF управлять временем счета, то величина N, зарегистрированная частотомером, будет равна

$$N = \frac{c}{2 v_{ср} \cos \alpha}. \qquad (7.21)$$

Основная погрешность измерения средней скорости живого сечения определяется изменением скорости c от температуры, неточностью измерения базы L и времени (частоты).

Кроме того, в погрешность измерения средней скорости входит погрешность измерения угла α.

В естественных руслах погрешность, вызываемая углом α, может быть устранена, если промеры вести вдоль базы. В этом случае измеренная площадь сечения будет в $\sec \alpha$ раз больше, а расход не будет зависеть от угла α.

Глава VIII

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ

§ 8.1. Классификация методов измерения направления течения воды

Основные методы измерения направления течения воды представлены на рис. 8.1.

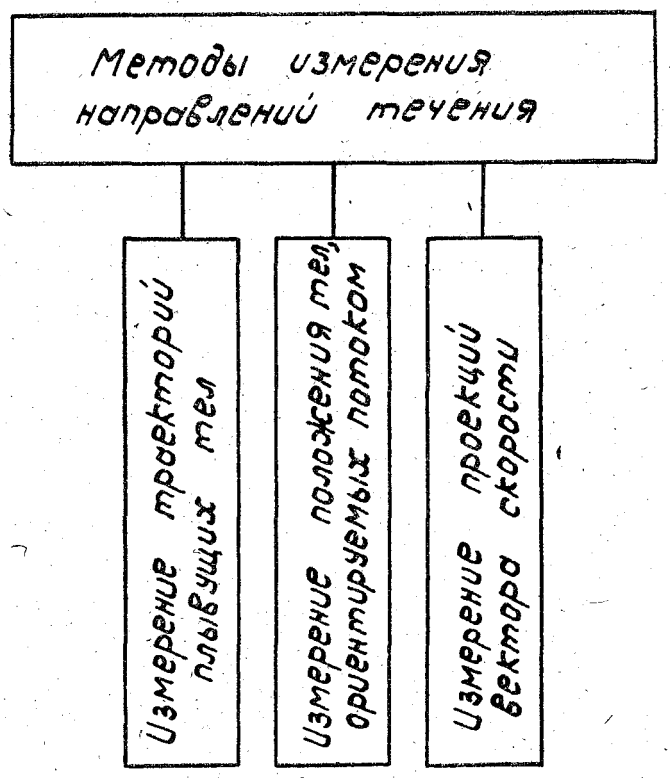


Рис. 8.1. Методы измерения направления течения.

В настоящей главе рассматриваются только два последних метода.

§ 8.2. Измерение направления течения по положению тела, ориентируемого потоком

В основе этого метода лежит явление силового воздействия потока на тело, находящееся в потоке.

Этот метод реализуется с помощью указателя направления, имеющего ось вращения и хвостовое оперение. Так как чаще всего изменяется азимут течения, то указатель направления имеет вертикальную ось вращения.

Для исследования работы такого устройства рассмотрим упрощенную конструкцию, изображенную на рис. 8.2.

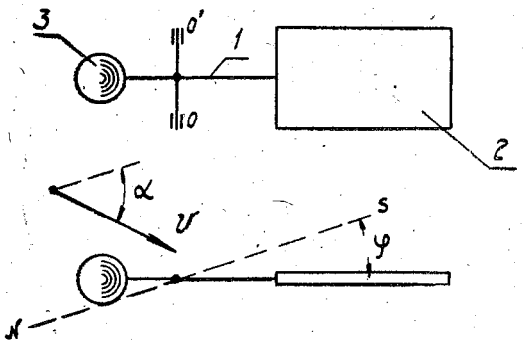


Рис. 8.2. Схема указателя направления течения с хвостовым оперением: *1* — шток; *2* — хвостовое оперение; *3* — противовес.

Вокруг вертикальной оси OO' поворачивается шток *1*, на одном конце которого укреплено хвостовое оперение *2*, а на другом — противовес *3*.

Основными силами, действующими на все устройство, являются:

а) силы инерции, момент которых может быть представлен как

$$-J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (8.1)$$

где J — момент инерции устройства относительно вертикальной оси вращения, кгм^2; ω — скорость поворота устройства вокруг вертикальной оси, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; t — время, с;

б) сила сухого трения, момент которой равен

$$-A \operatorname{sign} \omega, \qquad (8.2$$

где A — коэффициент, зависящий от коэффициента трения в подшипниках вертикальной оси и нагрузки на подшипники, Н·м; $\operatorname{sign}\omega$ — символ, равный $+1$, если $\omega > 0$ и равный -1, если $\omega < 0$;

в) сила вязкого трения, момент которой равен

$$-B\,\omega^2 \operatorname{sign}\omega, \tag{8.3}$$

где B — коэффициент, зависящий от размеров и конфигурации всего устройства и вязкости воды, Н·м·с;

г) сила динамического воздействия потока, момент которой может быть найден следующим образом.

Разложим вектор гидродинамического усилия P на две составляющие: касательную к лопасти хвостового оперения T и нормальную к ней F [1]. Очевидно, касательная составляющая не создает момента вокруг вертикальной оси, а нормальная дает момент, равный

$$-Cv^2[C_y \cos(\varphi-\alpha)+C_x \sin(\varphi-\alpha)], \tag{8.4}$$

где C — коэффициент, зависящий от размеров хвостового оперения и плотности воды, $\frac{\text{Н·с.}}{\text{м}}$; C_x и C_y — безразмерные коэффициенты, зависящие от конфигурации хвостового оперения и угла, под которым оно встречает поток; v — скорость течения воды, м/с; α — азимут течения воды, рад; φ — азимут указателя направлений, рад.

Заметим, что

$$\varphi = \int_0^t \omega dt. \tag{8.5}$$

Складывая все моменты и приравнивая их нулю, можно получить

$$J\frac{d\omega}{dt} + A \operatorname{sign}\omega + B\,\omega^2 \operatorname{sign}\omega + Cv^2[C_y \cos(\varphi-\alpha)+C_x \sin(\varphi-\alpha)[= \tag{8.60}$$

Таким образом, в общем случае устройство описывается интегро-дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами.

При отсутствии сухого трения ($A = 0$) в установившемся режиме $\left(\omega = 0;\ \frac{d\omega}{dt} = 0\right)$ имеем

$$C_y \cos(\varphi-\alpha)+C_x \sin(\varphi-\alpha) = 0. \tag{8.7}$$

Отсюда

$$\varphi=\alpha, \tag{8.8}$$

так как C_y при $\alpha=\varphi$ равен 0.

Следовательно, в установившемся режиме при отсутствии сухого трения азимут устройства будет совпадать с азимутом течения.

Аналитическое исследование поведения указателя направления течения в динамике не представляется возможным из-за сложности уравнения (8.6). При малых отклонениях указателя направления от положения равновесия уравнение (8.6) можно несколько упростить заменой

$$\varphi-\alpha=x, \tag{8.9}$$

где x — малая величина, рад.

Тогда $\sin x \simeq x$, а $\cos x \simeq 1$.

Если направление вектора скорости не изменяется, то

$$\omega=\frac{d\varphi}{dt}=\frac{dx}{dt}, \text{ а } \frac{d\omega}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2},$$

следовательно, уравнение (8.6) может быть представлено в виде

$$J\frac{d^2x}{dt^2}+A\operatorname{sign}\frac{dx}{dt}+B\left(\frac{dx}{dt}\right)^2\operatorname{sign}\frac{dx}{dt}+Cv^2(C_y+C_x x)=0. \tag{8.10}$$

Оценим величину статической ошибки в определении азимута течения, вызываемой моментом сухого трения. Абсолютная величина этой ошибки может быть найдена из условия

$$A=Cv^2(C_y+C_x\cdot x). \tag{8.11}$$

Из выражения (8.11) следует, что эта ошибка зависит от соотношения коэффициентов A, C, C_x и C_y и уменьшается с увеличением скорости потока.

Коэффициент A зависит от качества подшипников и веса конструкции, а коэффициент C пропорционален площади лопасти хвостового оперения. Из выражения (8.11) при известных коэффициентах A, C, C_x и C_y может быть найден порог чувствительности всего устройства.

Так как уравнение (8.10) не содержит явно t, то оно допускает понижение порядка заменой $\frac{dx}{dt}=p$ и $\frac{d^2x}{dt^2}=p\frac{dp}{dx}$. Полученное нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка

может быть исследовано методом фазовых траекторий на плоскости $\left(p;\ \frac{dp}{dx}\right)$, разработанным акад. А. А. Андроновым.

Уравнение (8.10) для малых скоростей потока и малых отклонений от положения равновесия допускает дальнейшую линеаризацию, поскольку силы вязкого трения можно считать пропорциональными первой степени угловой скорости. Экспериментально установлено [1], что указатель направления описывается уравнением второго порядка с переменными коэффициентами

$$T^2 \frac{d^2x}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx}{dt} + x = 0, \qquad (8.12)$$

где $T = \frac{k}{v}$ — постоянная времени указателя направления; v — скорость потока воды; κ и ξ — коэффициенты, зависящие от размеров и конфигурации указателя направлений.

Измерение азимута течения указателем направления сводится, таким образом, к измерению положения последнего относительно меридиана. Такое измерение может быть выполнено либо непосредственно по шкале, либо путем преобразования угла поворота с помощью реостатного преобразователя в изменение сопротивления и ток, измеряемый логометром, либо передачей на расстояние с помощью синхронной передачи на переменном или постоянном токе. Последний способ используется в измерителе течения ГР-42, разработанном в ГГИ П. Н. Бурцевым.

На рис. 8.3 представлена принципиальная электрическая схема потенциометрического дистанционного компаса ПДК-3, используемого в ГР-42.

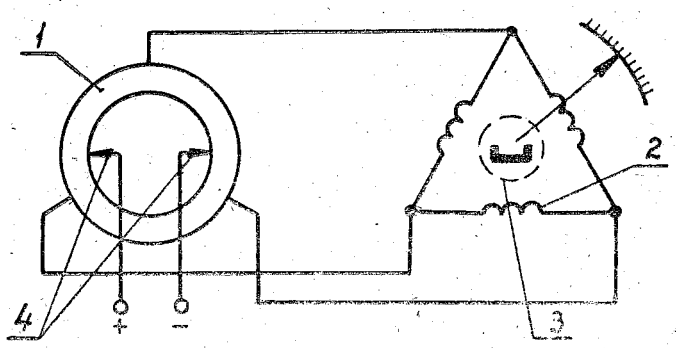


Рис. 8.3. Схема потенциометрической дистанционной системы:
1 — круговой потенциометр; *2* — обмотки статора; *3* — постоянный магнит; *4* — щетки.

Обмотка кругового потенциометра *1* разделена на три равные секции. В приемнике *2* имеются три обмотки, образующие статор. Ротором приемника является постоянный цилиндрический магнит *3*, свободно поворачивающийся вокруг своей оси. Поворот щеток *4* относительно кругового потенциометра вызывает перераспределение потенциалов на секциях и токов в проводах и обмотках статора приемника. Соответственно этому происходит поворот магнита и стрелки, скрепленной с ним.

§ 8.3. Измерение направления течения по составляющим вектора скорости

В основе этого метода лежит хорошо известная зависимость между вектором $\vec{u}$ и его проекциями u_x, u_y и u_z:

$$\vec{u}=u_x\vec{i}+u_y\vec{j}+u_z\vec{k}.$$

где $\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$ — орты — единичные векторы трех ортогональных осей.

В этом случае углы, которые вектор скорости составляет с осями $\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$, равны

$$\cos\alpha=\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2}}; \qquad (8.13)$$

$$\cos\beta=\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2}}; \qquad (8.14)$$

$$\cos\gamma=\frac{u_z}{\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2}}, \qquad (8.15)$$

где α, β и γ — углы между вектором v и ортами $\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$ соответственно.

Таким образом, направление вектора скорости будет известно, если будут известны три составляющие его вдоль ортогональных осей.

Такой метод измерения возможен в том случае, если имеется датчик скорости, который реагирует не только на величину, но и на знак скорости потока.

Таким требованиям удовлетворяет наиболее полно датчик, изображенный на рис. 6.8, да и то только для измерения двух горизонтальных составляющих скорости потока.

Этому требованию частично удовлетворяют некоторые конструкции термоанемометров и гидроакустический метод измерения скорости, однако для измерения местной скорости гидроакустическим методом препятствует очень малая величина отношения $\frac{v}{c} \leqslant \frac{1}{300}$, где v — скорость потока, м/с, а c — скорость распространения ультразвука в воде, м/с.

Глава IX

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

§ 9.1. Классификация методов измерения температуры

Основные методы измерения температуры представлены на рис. 9.1.

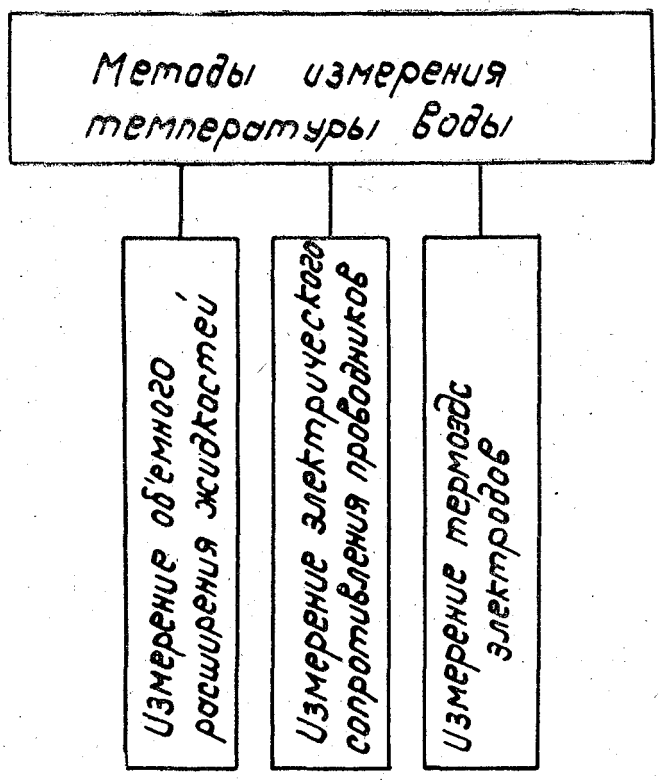


Рис. 9.1. Методы измерения температуры.

В этой главе рассматриваются только два первых метода измерения температуры как наиболее распространенные.

§ 9.2. Измерение температуры ртутным термометром

В основе этого метода лежит зависимость объемного расширения жидкостей от температуры (явление термострикции). Хотя устройство и конструкция ртутного термометра общеизвестна, тем не менее зависимость перемещения ртути в капилляре от температуры с учетом расширения стенок колбы довольно сложная и выходит за рамки данного курса. Ртутные термометры обладают высокой точностью, простотой и надежностью, но требуют непосредственного участия наблюдателя.

В 1950 г. в ГГИ А. М. Димаксяном совместно с П. Н. Бурцевым была разработана конструкция дистанционного ртутного термометра [1]. Этот прибор представляет собой устройство, состоящее из специального ртутного термометра с приспособлением для преобразования и передачи на расстояние показаний термометра. Он может измерять температуры в пределах от —38 до +50° с погрешностью 0,2° по число-импульсному методу, рассмотренному в § 4.3.

Ходовой винт с гайкой и щупом, диаметром 0,15—0,2 мм, смонтированы внутри ртутного термометра. Передача вращения от двигателя к винту происходит электромагнитным путем.

Для сигнализации о достижении предельных (нижней и верхней) температур широко используются контактные ртутные термометры (рис. 9.2), выпускаемые промышленностью на различные диапазоны температур.

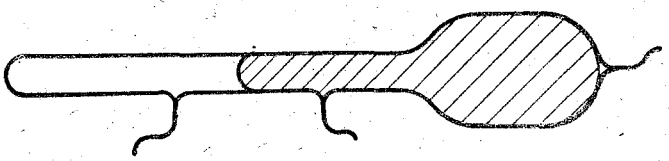


Рис. 9.2. Ртутный контактный термометр.

§ 9.3. Измерение температуры воды электротермометром

Физические основы этого метода и конструкции датчиков электротермометров с достаточной полнотой рассматривались в § 2.4.

В гидрометрии в настоящее время используются два электротермометра: микроэлектротермометр ГР-51 и электротермометр гидрологический полевой ГР-41. Оба электротермометра, разработанные в ГГИ, имеют идентичные принципиальные электрические

схемы и отличаются только диапазоном температур, точностью отсчета температуры по шкале, глубиной погружения датчика и весом прибора.

Данные этих электротермометров приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Наименование	ГР—51	ГР—41
Диапазон измеряемых температур	−0,2÷+1,6°	−1÷+35°
Точность отсчета	±0,01°	±0,1°
Длина кабеля связи с датчиком	12 м	40 м
Вес прибора	8 кг	28 кг

Принципиальная схема электротермометра ГР-41 представлена на рис. 9.3.

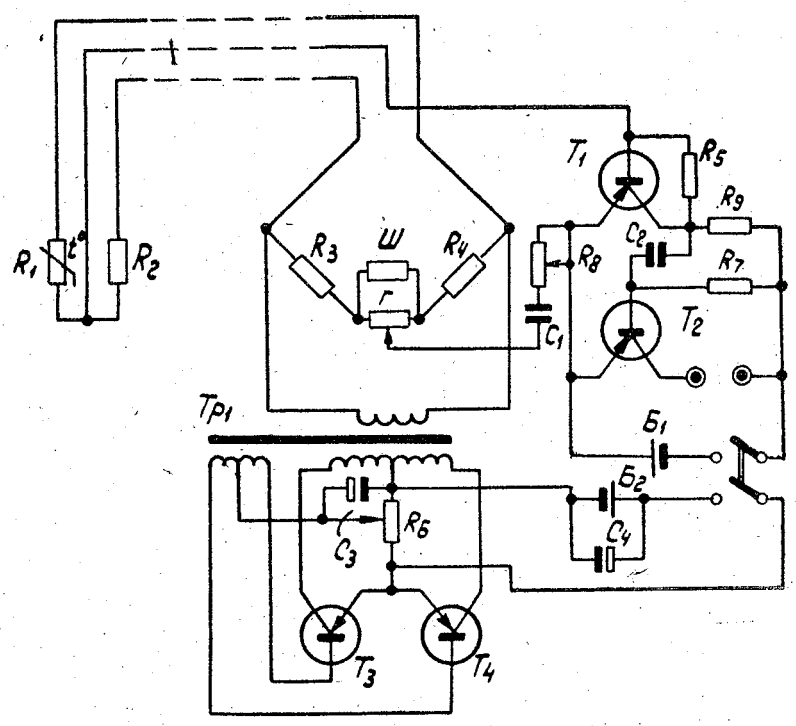


Рис. 9.3. Принципиальная электрическая схема электротермометров ГР-41 и ГР-51.

Два плеча схемы моста R_1 и R_2 вынесены на конец трехжильного кабеля дистанционной линии связи. Термочувствительным элементом является термосопротивление $R_1 = 53$ ома при 0° С, выполненное из медной проволоки. Два других плеча моста R_3 и R_4 находятся в измерительной части прибора. Уравновешивание моста производится вручную с помощью реостатного преобразователя реохордного типа *r*, шунтированного сопротивлением *Ш*. В качестве нуль-индикатора баланса моста применены телефоны, включенные в измерительную диагональ с помощью двухкаскадного полупроводникового усилителя на транзисторах T_1 и T_2.

Мост питается переменным током звуковой частоты от генератора на транзисторах T_3 и T_4.

Питание усилителя и генератора раздельное от сухих гальванических батарей 145У или 1,6 ПМЦ-Х-32.

Глава X

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

§ 10.1. Классификация методов измерения мутности взвешенных наносов

Основные методы измерения мутности взвешенных наносов представлены на рис. 10.1.

Рис. 10.1. Методы измерения мутности.

В настоящей главе рассматриваются только радиоактивный и фотоэлектрический методы измерения мутности. Гидроакустический метод в гидрометрии пока не используется, хотя имеются сведения [1], что гидроакустическим методом можно измерять концентрации составляющих в трехкомпонентных средах.

§ 10.2. Фотоэлектрический метод измерения мутности взвешенных наносов

В основе этого метода лежит зависимость ослабления (поглощения и рассеяния) светового потока частицами наносов, взвешенных в воде.

Ослабление плоского монохроматического светового потока изменяется по закону

$$I = I_0 e^{-A\pi r^2 N(r) L}, \tag{10.1}$$

где I_0 — величина светового потока, подающего на суспензию, лм; I — световой поток, прошедший через смесь толщиной L; r — радиус частиц, м; $N(r)$ — число частиц радиуса r в единице объема; A — безразмерный коэффициент, зависящий от размеров и расположения фотоэлектрического приемника.

Для n-компонентной смеси формула 10.1 имеет вид

$$I = I_0 e^{-A\pi L \sum_{i=1}^{n} r_i^2 N_i}. \tag{10.2}$$

Таким образом, ослабление пропорционально числу частиц и второй степени их радиуса. Мутность же наносов пропорциональна числу частиц и третьей степени их радиуса. Следовательно, фотоэлектрический мутномер нельзя проградуировать в значениях мутности для произвольного фракционного состава наносов.

Измерение мутности фотоэлектрическим методом может быть произведено с использованием фракциометра. При этом могут быть определены и мутность и фракционный состав наносов в пробе [2] на основании данных об ослаблении светового потока в течение времени осаждения наносов. Измерение ослабления светового потока производится с помощью фотоэлектрических преобразователей с внешним или внутренним фотоэффектом (§ 2.11).

Формулы для измерения мутности имеют вид (для частиц радиуса $r \geqslant 1{,}5$ мм, $0{,}15$ мм $\leqslant r < 1{,}5$ мм и $r < 0{,}15$ мм соответственно)

$$\rho = P \int_0^{t_1} \frac{1}{t^2 I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt}\, dt; \qquad (10.3)$$

$$\rho = Q \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{t I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt}\, dt; \qquad (10.4)$$

$$\rho = R \int_{t_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{t I(t)}} \cdot \frac{dI(t)}{dt}\, dt, \qquad (10.5)$$

где P, Q и R — коэффициенты, устанавливаемые при тарировке прибора.

§ 10.3. Радиоактивный метод измерения мутности взвешенных наносов

В основе этого метода лежит зависимость ослабления γ-лучей от концентрации твердых частиц в суспензии.

Связь между весом $m_н$ и концентрацией $W_н$ наносов в облучаемом объеме и ослаблением γ-лучей имеет вид [3]:

$$m_н = S \rho_н \frac{\ln \frac{I_0}{I} - \mu_в h}{\mu_н - \mu_в}; \qquad (10.6)$$

$$W_н = \frac{\rho_н}{h} \frac{\ln \frac{I_0}{I} - \mu_в h}{\mu_н - \mu_в}; \qquad (10.7)$$

где S — площадь облучаемого объема суспензии, см^3; $\rho_н$ — объемный вес сухих наносов в г/см^2; $\mu_в$ — массовый коэффициент поглощения воды, см^2/г; $\mu_н$ — массовый коэффициент поглощения наносов, см^2/г; h — расстояние между источником и детектором, см; I_0 — интенсивность источника; I — интенсивность лучей, прошедших слой воды h.

Из формул (10.6) и (10.7) следует, что размеры частиц не входят в выражения, что является существенным преимуществом этого метода. Некоторым недостатком является низкий порог чувствительности (± 4 г/л).

ЛИТЕРАТУРА

К главе I

1. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968, 248 с.
2. Темников Ф. Е., Афонин В. А., Дмитриев В. И. Теоретические основы информационной техники. М., «Энергия», 1971, 424 с.
3. Димаксян А. М. Гидрологические приборы. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 284 с.

К главе II

1. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М-Л., «Энергия», 1966, 690 с.

К главе III

1. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М-Л., «Энергия», 1966, 690 с.

К главе IV

1. Димаксян А. М. Гидрологические приборы. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 284 с.
2. Фремке А. В. Телеизмерения. М-Л., Госэнергоиздат, 1958, 304 с.
3. Арбузов И. А., Мильштейн А. В. Исследование динамики релейных систем автоматического регулирования в гидростатических уровнемерах с уравновешивающим преобразованием. Тр. ЛГМИ, вып. 44, 1971, с. 98—105.
4. Арбузов И. А. К точности измерения уровня гидростатическим уровнемером с воздушным колоколом. Тр. ЛГМИ, вып. 44, 1971, с. 92—97.
5. Димаксян А. М. Новые телеизмерительные гидрометрические приборы. Л., Гидрометеоиздат, 1957, 136 с.

К главе V

1. Аверкиев В. П. Гидроакустические рыбопоисковые и навигационные приборы. Л., «Судостроение», 1967, 217 с.

К главе VI

1. Быков В. Д., Васильев А. В. Гидрометрия. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 448 с.
2. Арбузов И. А. Поведение гидрометрической вертушки в пульсирующем потоке. Тр. ЛГМИ, вып. 46, 1972, с. 94—103.
3. Приборы для гидравлических исследований. Тр. Координационных совещаний по гидротехнике, вып. 51. Л., «Энергия», 1969, 244 с.
4. Ильинский В. М. Бесконтактное измерение расходов. Б-ка по автоматике, вып. 400, М., «Энергия», 1970, 112 с.
5. Димаксян А. М. Результаты экспериментальных исследований прибора для измерения скоростей течения радиоактивным методом (РД-1С). Тр. ГГИ, вып. 130, 1965, с. 163—183.
6. Донченко Э. Г., Маякин В. П. Электронные системы для автоматизированного измерения характеристик потоков жидкостей и газов. Б-ка по автоматике, вып. 402, М., «Энергия», 1970, 85 с.

К главе VII

1. Ильинский В. М. Бесконтактное измерение расходов. Б-ка по автоматике. вып. 400. М., «Энергия», 1970, 112 с.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры. М-Л., Машгиз, 1963, 656 с.
3. Биргер Г. И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры. М., «Металлургия», 1964, 382 с.

К главе VIII

1. Торочков В. Ю., Суражский Д. Я., Сыйко А. А. Частотный анализ работы приемников ветроизмерительных приборов. М., Гидрометеоиздат, 1964, 64 с.

К главе IX

1. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.-Л., «Энергия», 1966, 690 с.

К главе X

1. Тибабишев В. Н., Ульшин В. А. О возможности ультразвукового метода измерения концентраций составляющих в трехкомпонентных средах. Прикладная акустика и вибрационная техника, Киев, «Наукова думка», 1968, с. 59—65.
2. Арбузов И. А., Попова А. А. Фотоэлектрический метод анализа крупности наносов и измерения мутности. Тр. ЛГМИ, вып. 46, 1972, с. 104—109.
3. Димаксян А. М. О радиоактивном методе измерения концентрации речных наносов. Тр. ГГИ, вып. 77, 1960, с. 129—141.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава I. **Элементы информационной теории измерительных устройств**

§ 1.1. Сущность измерения 5
§ 1.2. Последовательный натуральный ряд 5
§ 1.3. Шкала реперов измеряемой величины 6
§ 1.4. Измерение по натуральным шкалам 6
§ 1.5. Функциональная шкала 7
§ 1.6. Единица измерения 7
§ 1.7. Определения измерения и измерительного устройства 8
§ 1.8. Функция преобразования измерительного устройства 8
§ 1.9. Интервал неопределенности 9
§ 1.10. Разрешающая способность прибора. Квантование по уровню . . 11
§ 1.11. Квантование во времени 12
§ 1.12. Частотный критерий отсчетов во времени 13
§ 1.13. Критерий отсчетов в пространстве 14
§ 1.14. Связь между передачей информации и обменом энергии . . . 14
§ 1.15. Энергетический порог чувствительности 15
§ 1.16. Пути совершенствования измерительных приборов 16
§ 1.17. Структура электрических приборов для измерения неэлектрических величин 17
§ 1.18. Общие свойства измерительных преобразователей 20

Глава II. **Измерительные преобразователи неэлектрических величин в электрические**

А. Электромеханические измерительные преобразователи 22
§ 2.1. Резистивные преобразователи 22
§ 2.2. Электростатические преобразователи 27
§ 2.3. Электромагнитные преобразователи 32
Б. Тепловые преобразователи 40
§ 2.4. Термосопротивления 41
§ 2.5. Термоэлектрические преобразователи 45
В. Электрохимические преобразователи 48
§ 2.6. Электролитические преобразователи 48
§ 2.7. Гальванические преобразователи 50
§ 2.8. Полярографические преобразователи 53
§ 2.9 Химотронные (солионные) преобразователи 56
Г. Электронные преобразователи 57
§ 2.10. Преобразователь с термоэлектронной эмиссией 57
§ 2.11. Преобразователи с фотоэлектронной эмиссией 58
Д. Ионизационные преобразователи 63

Глава III. Методы построения электрических приборов для измерения неэлектрических величин

§ 3.1. Структура и свойства приборов, построенных по методу прямого преобразования . . . 67
§ 3.2. Суммирование погрешностей . . . 67
§ 3.3. Динамические погрешности измерительных устройств . . . 69
§ 3.4. Мостовые измерительные цепи электрических приборов для измерения неэлектрических величин . . . 76
§ 3.5. Структура и свойства приборов, построенных по методу уравновешивающего преобразования . . . 79
§ 3.6. Обратные измерительные преобразователи . . . 81
§ 3.7. Общие свойства приборов с частотными, временными и фазовыми измерительными устройствами . . . 84
§ 3.8. Измерительные цепи для частотных, временных и фазовых измерительных устройств . . . 87
§ 3.9. Цифровой частотомер . . . 88
§ 3.10. Метод построения приборов со счетными измерительными устройствами . . . 90
§ 3.11. Метод построения приборов со считывающими измерительными устройствами . . . 90
§ 3.12. Техническое задание на проектирование прибора . . . 90

Глава IV. Методы измерения уровня воды

§ 4.1. Классификация методов измерения уровня воды . . . 93
§ 4.2. Метод, основанный на измерении положения плавающих тел . . . 94
§ 4.3. Метод, основанный на измерении положения поверхности воды. 99
§ 4.4. Электрические (параметрические) уровнемеры . . . 102
§ 4.5. Метод, основанный на измерении гидростатического давления 103

Глава V. Методы измерения глубины

§ 5.1. Классификация методов измерения глубины . . . 109
§ 5.2. Гидроакустический метод измерения глубины . . . 110

Глава VI. Методы измерения скорости течения воды

§ 6.1. Классификация методов измерения скорости течения воды . . . 116
§ 6.2. Метод, основанный на фиксации числа оборотов лопастного винта 116
§ 6.3. Метод, основанный на фиксации скоростного напора . . . 122
§ 6.4. Метод, основанный на фиксации величины силового воздействия потока . . . 124
§ 6.5. Метод, основанный на фиксации скорости плывущего тела . . . 126
§ 6.6. Метод, основанный на принципе теплообмена . . . 129

Глава VII. Методы измерения расхода воды

§ 7.1. Классификация методов измерения расхода воды . . . 133
§ 7.2. Измерение расхода методом смешения . . . 134
§ 7.3. Индукционный метод измерения расхода . . . 137
§ 7.4. Гидроакустический метод измерения расхода воды . . . 138

Глава VIII. Методы измерения направления течения воды

§ 8.1. Классификация методов измерения направления течения воды 140
§ 8.2. Измерение направления течения по положению тела, ориентируемого потоком . . . 141
§ 8.3. Измерение направления течения по составляющим вектора скорости . . . 145

Глава IX. Методы измерения температуры воды

§ 9.1. Классификация методов измерения температуры 147
§ 9.2. Измерение температуры ртутным термометром 148
§ 9.3. Измерение температуры воды электротермометром 148

Глава X. Методы измерения мутности взвешенных наносов

§ 10.1. Классификация методов измерения мутности взвешенных наносов 151
§ 10.2. Фотоэлектрический метод измерения мутности взвешенных наносов 152
§ 10.3. Радиоактивный метод измерения мутности взвешенных наносов 153
Литература 154