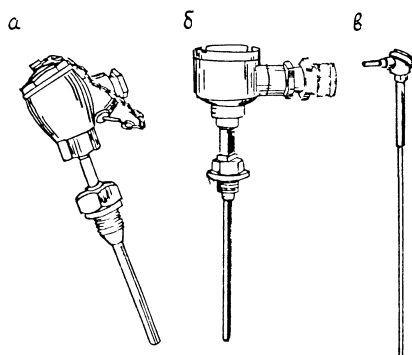


А. Г. Сошинов

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАМЫШИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
КАФЕДРА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. Г. Сошинов

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

РПК “Политехник”
Волгоград
2002

УДК 621.314
С69

Сошинов А. Г. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН: Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2002. – 36 с.

Написаны в соответствии с курсом “Информационно – измерительная техника и электроника” для студентов направления 650900 “Электроэнергетика” по специальности 100400 “Электроснабжение”.

Рассматриваются методы электрических измерений различных неэлектрических величин и измерительная аппаратура, применяемая при монтаже, наладке и эксплуатации электроустановок.

Предназначены в помощь студентам при организуемой самостоятельной работе и проведении практических занятий по теме “Измерение неэлектрических величин”.

Ил. 30. Табл. 2. Библ.: 5 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

© Волгоградский
государственный
технический
университет, 2002

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение неэлектрических величин сводится к тому, что они преобразуются в зависимую от них величину, при измерении которой определяется и неэлектрическая величина.

Электрические приборы для измерения неэлектрических величин состоят из трех узлов: преобразователя (датчика), измерительного устройства и указателя.

Преобразователь (датчик) устройство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для ее передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения.

Основной характеристикой преобразователя $\alpha=f(x)$ называется функциональная зависимость выходной величины, выведенная аналитическим или графическим путем.

Чувствительность – $S=\Delta\alpha/\Delta x$ есть отношение приращения показателя $\Delta\alpha$ указателя к приращению Δx измеряемой величины x .

Под **порогом чувствительности** понимается минимальное измерение значения входной величины, которое может быть зарегистрировано преобразователем.

Предел преобразования – это максимальное значение входной величины, которое может быть воспринято преобразователем без его повреждения.

Погрешностью преобразователя называется отклонение его реальной характеристики от номинальной, полученной при первоначальной градуировке.

В зависимости от того явления, которое используется для преобразования неэлектрической величины в электрическую, преобразователи делятся на три группы:

электромеханические (контактные, реостатные, тензометрические, электростатические, электромагнитные);

тепловые и электрохимические (термоэлектрические, термосопротивления, электрохимические);

электронные и ионизационные (электронные, ионные, ионизационные).

По виду получаемой на выходе преобразователя выходной величины все типы преобразователей можно разделить на две группы: **параметрические** и **генераторные**.

Если входная неэлектрическая величина преобразуется в один из параметров электрической цепи (R – сопротивление, L – индуктивность, M – взаимная индуктивность, C – емкость), для измерения которой не-

обходимо применение источника питания, то преобразователь называется *параметрическим*, если неэлектрическая величина преобразуется в электродвижущую силу (ЭДС), то преобразователь называется *генераторным*.

К **параметрическим измерительным преобразователям** относятся: резистивные, индуктивные и взаимоиндуктивные, магнитоупругие, емкостные, электролитические, фотоэлектрические преобразователи и терморезисторы.

К **генераторным измерительным преобразователям** можно отнести: индукционные, пьезоэлектрические, термоэлектрические и некоторые разновидности электрохимических преобразователей.

К преобразователям как основным элементам приборов для измерения неэлектрических величин предъявляется ряд специфических требований: постоянство во времени функции преобразования (обычно линейной); высокая чувствительность; малая погрешность; высокие динамические свойства (возможность измерения переходных процессов).

Измерительные устройства служат для преобразования полученного на выходе преобразователя электрического параметра в удобную для измерения электрическую величину. Они выполняются в виде отдельного самостоятельного конструктивного узла и содержат измерительные цепи, усилители, источники питания, стабилизаторы и другие элементы.

Указатель исполняет роль регистрирующего прибора, проградуированного в единицах измерения неэлектрической величины. В качестве указателя используются различные электрические приборы, измеряющие тот или иной электрический параметр, связанный с измеряемой неэлектрической величиной.

По способу снятия отсчета указатели делятся на:

визуальные, в качестве которых используются магнитно-электрические механизмы, электроннолучевые трубки, автоматические показывающие мосты и потенциометры, а также цифровые приборы;

регистраторы, назначение которых состоит в записи измеряемой величины в том или другом виде (самопишущие приборы, светолучевые осциллографы и тому подобное).

Основные требования к указателям такие же, как и к приборам для измерения электрических величин.

Методы измерения неэлектрических величин

Метод **непосредственной оценки** позволяет получить результат измерения путем последовательного преобразования измеряемой величины в величину, пропорциональную отклонению подвижной части указателя.

На рис. 1.1 показана структурная схема непосредственного измерения неэлектрической величины x . Преобразователь $Пр$ преобразует величину x в электрический сигнал \mathcal{E} . Этот сигнал, в свою очередь, с помощью измерительного устройства (измерительной цепи) преобразуется в

функцию \mathcal{E} . Ток отклоняет указатель на угол α .

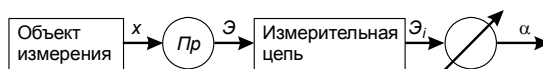


Рис. 1.1. Структурная схема метода непосредственного измерения

Метод **сравнения** характеризуется наличием двух цепочек измерения (рис. 1.2), в одну из которых включается рабочий преобразователь $Пр_x$, а в другую – образцовый $Пр_N$. Измерительное устройство, выполненное в виде разностного звена, вырабатывает сигнал $\Delta\mathcal{E}$, пропорциональный разности между измеряемой величиной x и эталонной величиной N . По сигналу разности $\Delta\mathcal{E}$ отградуирован указатель α .

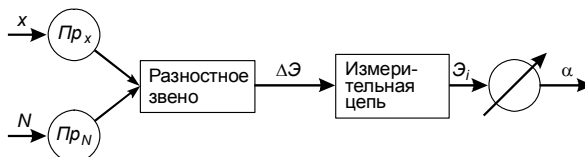


Рис. 1.2. Структурная схема метода сравнения

Компенсационный метод (рис. 1.3) заключается в компенсации измеряемой величины x такой же по характеру величиной x_k , получаемой с помощью обращенного преобразователя, включенного в цепь обратного преобразования. Момент компенсации x улавливается нуль-индикатором. С помощью регулирующего устройства изменяется величина электрического сигнала \mathcal{E} . Часть этого сигнала отбирается в цепь обратного преобразования для изменения компенсирующей величины x_k . По величине сигнала \mathcal{E} , измеряемого отклонением указателя α , судят о значении неэлектрической величины x . Компенсационный метод является наиболее точным из перечисленных методов измерения.

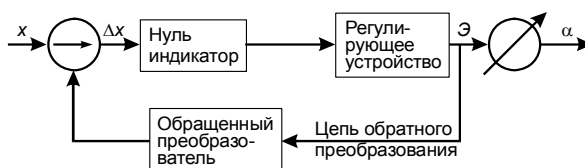


Рис. 1.3. Структурная схема компенсационного метода

Ниже рассматриваются некоторые типы преобразователей, используемых в приборах.

2. КОНСТРУКТИВНОЕ УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Резистивные преобразователи

Резистивные измерительные преобразователи подразделяются на *реостатные* и *тензочувствительные*.

Реостатным преобразователем называют реостат, движок которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины.

Входной величиной реостатного преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, к которому должна быть сведена измеряемая величина. Выходной величиной является активное сопротивление, распределенное линейно или по угловому закону движения этого движка.

Устройство реостатного преобразователя показано на рис. 2.1.

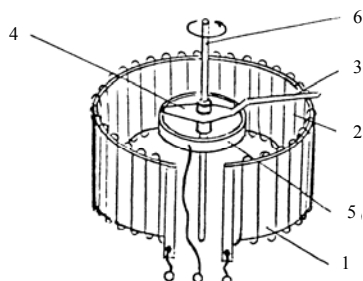


Рис. 2.1. Устройство реостатного преобразователя

На корпус 1 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом проволока 2. Изоляция проволоки на верхней грани каркаса защищается, и по металлу перемещается щетка 3. Добавочная щетка 4 скользит по токосъемному кольцу 5. Обе щетки изолированы от приводного валика 6. В качестве материала провода для реостатных преобразователей применяют манганин, константан или фехраль. В ответственных случаях используют платиноиридиевую проволоку (90% Pt + 10% Ir). Диаметр проволоки равен 0,03 мм. Это позволяет изготавливать малогабаритные высокоомные преобразователи (весом 10-12 г при размерах 1×2 см). Основные материалы, применяемые для намотки реостатных преобразователей, и их свойства приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Данные о материалах проволоки, употребляемой
для намотки реостатных преобразователей

Название материала	Состав, %	Удельное сопротивление, Ом	Температурный коэффициент сопротивления $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$	Максим. рабочая темпер., $^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент линейного расширения $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$
Константан	60 Cu; 40 Ni;	0,480	5	500	15,2
Нихром	60 Ni; 15 Cr	1,1-1,2	130	1050	14
Манганин	85 Cu; 12 Mn; 2-4 Ni	0,42-2,08	29-40	300	23
Фехраль	80 Fe, 12-15 Cr 3-4,5 Al	1,38	при 20 $^\circ\text{C}$ -15 $^\circ\text{C}$	1200	17
		1,38	при 400 $^\circ\text{C}$ -50 $^\circ\text{C}$	1200	17
Никель	99,5 Ni	0,0703-0790	6,000	—	13,1

Провод реостата должен быть покрыт эмалью или слоем окислов, изолирующих соседние витки друг от друга. Место движения щетки по виткам зачищается и полируется. Щетки выполняются из того же материала, что и реостат, либо в виде пластин из серебра или фосфористой бронзы.

Каркас реостатного преобразователя выполняется из текстолита или пластмассы. Применяют такие каркасы из алюминия, покрытого изоляционным лаком или оксидной пленкой слоем 10 мкм, обладающей изоляционными свойствами. Погрешность реостатных преобразователей зависит от числа витков W :

$$\gamma = \frac{100\%}{2}$$

т. е. с увеличением числа витков погрешность уменьшается.

Число витков выбирают равным $W=100 \div 200$ витков. Габариты преобразователя определяются с учетом значения измеряемого перемещения, сопротивления обмотки и мощности, выделяемой в обмотке.

В силу нелинейности изменения функции преобразования промежуточных звеньев измерительной системы зависимость угла α поворота стрелки измерителя от измеряемой величины также нелинейна. Чтобы сделать ее линейной применяют профилированные реостаты с нелинейным распределением сопротивления вдоль каркаса. Измерительными цепями для реостатных преобразователей служат мостовые и компенсационные цепи следящего уравнивания. Реостатные преобразователи

применяются для измерения угловых и линейных перемещений величин, которые могут быть преобразованы в эти перемещения. В качестве примера использования реостатного преобразователя для измерения неэлектрической величины рассмотрим устройство электрического бензиномера.

Электрический бензиномер применяется для измерения уровня горючего в баках автомобиля, самолета и тому подобное. Устройство прибора изображено на рис. 2.2, а.

От поплавка 1, погруженного в бак с бензином, идут тяги и рычаги 6 и 7 к движку 2 реостатного преобразователя 3. Для того чтобы пары горючего не могли проникнуть в камеру реостатного преобразователя, рычаг, передающий перемещение поплавка к движку, проходит через гибкую металлическую гофрированную трубку (сильфон) 4; эластичный сильфон, герметизируя камеру, не препятствует качанию рычага. Преобразователь крепится к баку при помощи фланца 5. Измерительная цепь уровнемера показана на рис. 2.2, б. Здесь указателем является магнитоэлектрический логометр, обе рамки которого включены последовательно с сопротивлением обеих половин реостатного преобразователя.

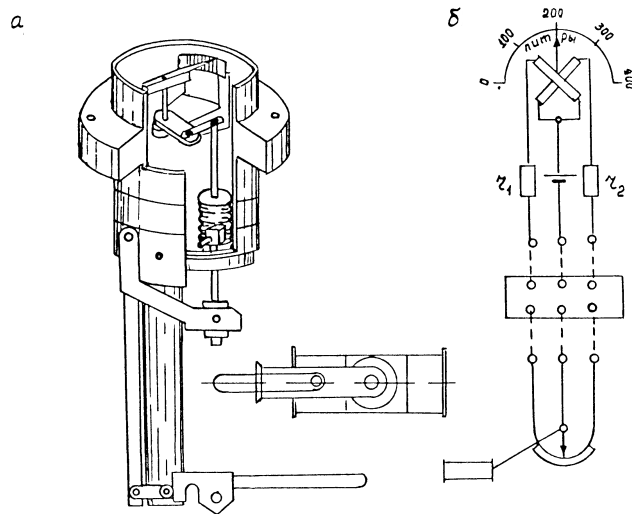


Рис. 2.2. Датчик и схема электрического бензиномера

При изменении положения движка, связанного с поплавком, токи в обеих рамках изменяются с различными знаками, вследствие чего изменяется отношение этих токов и отклонение стрелки указателя. Указатель градуируется в единицах количества топлива в баке. Погрешность прибора лежит в пределах 2-5%.

Тензочувствительные преобразователи (тензосопротивления).

В основу работы тензосопротивлений положен тензоэффект, заключающийся в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации. Существуют проволочные, фольговые и пленочные тензосопротивления.

Конструкция проволочного тензосопротивления представлена на рис. 2.3. На полоску тонкой и прочной бумаги 1 наклеивают уложенную зигзагообразно тонкую (0,02-0,05 мм) константановую, нихромовую или другую высокоомную проволоку 2. К ее концам припаивают выводы 3 из полосок фольги, которые используются для включения преобразователя в измерительную цепь. Сверху проволоки наклеивают бумагу. Проволочный преобразователь с помощью специального клея наклеивается на испытываемую деталь. При деформации поверхностного слоя детали преобразователь тоже деформируется и изменяет свое сопротивление. Измерительной базой преобразователя является расстояние l .

Промышленностью выпускаются тензосопротивления с $l=0,5 \div 150$ мм и сопротивлением $r=50 \div 500$ Ом. Отношение l/h равно 0,5.

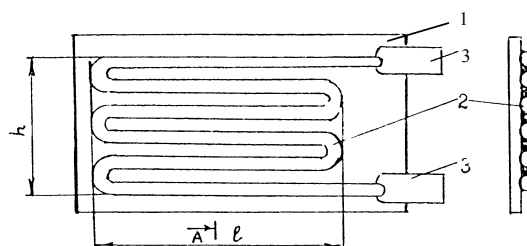


Рис. 2.3. Тензочувствительный проволочный преобразователь

Основной характеристикой применяемых в тензосопротивляемых материалах является тензочувствительность.

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l},$$

где R и l – соответственно сопротивление и длина тензочувствительного элемента.

Тензочувствительность может быть представлена в виде слагаемых S и S_1 :

$$S = S_1 + S_2,$$

$$S_1 = 1 + 2\mu,$$

$$S_2 = \frac{\Delta P / P}{\Delta l / l},$$

где μ – коэффициент Пуассона для металлов $\mu=0,2-0,4$;

S_1 – параметр, характеризующий изменение геометрических размеров;

S_2 – параметр, характеризующий изменение электрических свойств материала при деформациях.

Основным требованием к материалу тензосопротивлений является возможно большее значение S . В настоящее время широко применяются фольговые и пленочные тензосопротивления.

Фольговые преобразователи изготавливаются из фольги толщиной 4-12 мкм, на которой часть металла выбирается травлением, а оставшаяся часть образует решетку в виде готового тензосопротивления (рис. 2.4).

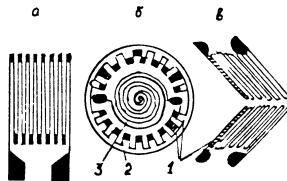


Рис. 2.4. Фольговые преобразователи: a – для измерений линейных деформаций; b – наклеиваемый на мембрану для измерения давления: 1 – подгонные петли; 2 – витки, чувствительные к усилиям, растягивающим мембрану; 3 – витки, чувствительные к сжимающим усилиям; $в$ – наклеиваемый на мембрану для измерения крутящих моментов.

Пленочные тензосопротивления изготавливаются путем возгонки в вакууме тензочувствительного материала и осаждения его затем на подложку определенной конфигурации.

Тензопреобразователи включаются в цепь делителя напряжения или мостовую цепь. Погрешность приборов с тензопреобразователями зависит от способа градуировки. При сравнительной градуировке погрешность преобразователя достигает 1,5%, а с учетом всех погрешностей (цепи, приборов и так далее) – 10-15%. При непосредственной градуировке и при возможности установки нуля перед каждым измерением погрешность может быть снижена до 0,2-0,5%.

Тензосопротивления используются в приборах для измерения деформаций неэлектрических величин: усилия, давления, моментов и так далее. Для примера рассмотрим устройство прибора для измерения давления (манометр) с использованием проволочных тензосопротивлений (рис. 2.5).

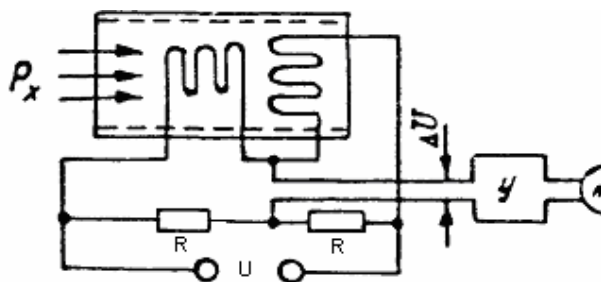


Рис. 2.5. Манометр с тензометрическим преобразователем

Схема состоит из измерительного преобразователя – стального цилиндра с наклеенными тензосопротивлениями R_p и R_k , включенными в мостовую схему усилителя с миллиамперметром на выходе.

Зависимость деформации и поверхности цилиндра ε_l от давления можно определить по формуле

$$\varepsilon_l = \frac{P_x r}{E h},$$

где P_x – измеряемое давление;
 r, h – радиус и толщина стенок цилиндра;
 E – модуль упругости стали.

Деформация ε_l воспринимается рабочим тензосопротивлением R_p . Компенсационное тензосопротивление R_k наклеенное вдоль образующей

цилиндра, служит для температурной компенсации.

При постоянстве напряжения U , питающего мост, сигнал на выходе моста ΔU пропорционален измеряемому давлению. Диапазон измеряемых давлений $5 \cdot 10^4 \div 10^7$ Па, приведенная погрешность $\pm 1,5\%$.

2.2. Индукционные преобразователи

Индукционными называются преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой механической величины преобразуется в индуктированную ЭДС. Индуктированная ЭДС определяется скоростью изменения магнитного потока Φ , сцепленного с катушкой из W витков:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}.$$

Следовательно, индукционные преобразователи возможно применять для измерения линейных и угловых перемещений.

Существует две группы индукционных преобразователей:

с неизменным сопротивлением на пути постоянного магнитного потока. В преобразователях подобного типа ЭДС в катушке наводится благодаря линейным (рис. 2.6,а) или угловым (рис. 2.6,б) перемещениям катушки;

с сопротивлением на пути постоянного магнитного потока, которое изменяется под действием преобразователей измеряемой величины.

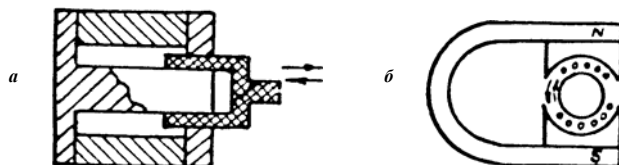


Рис. 2.6. Принцип устройства индукционных преобразователей: а – с подвижной катушкой, совершающей линейное перемещение; б – с подвижной катушкой, совершающей угловое перемещение.

Схема устройства такого преобразователя изображена на рис. 2.7. На валу укреплен стальной зуб M . При вращении вала этот зуб проходит мимо зазора неподвижно установленной магнитной системы с постоянным магнитом, уменьшая сопротивление зазора так, как показано на кривой R_M . При этом в катушке, надетой на магнит, наводятся импульсы ЭДС, форма которых показана на кривой e . Частота импульсов, выра-

женная в герцах, всегда будет в точности равна скорости вращения вала, выраженной в числе оборотов в секунду.

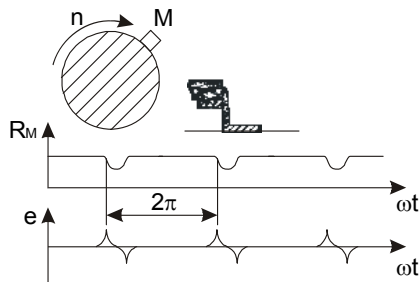


Рис. 2.7. Принцип действия простейшего датчика тахометра с индукционным преобразователем

Наиболее широкое распространение получили преобразователи первой группы в приборах для измерения: скорости вращения (тахометры), ускорения, расходов жидкостей и параметров вибрации.

Индукционный тахометр с вращающимся магнитным полем – простейший показывающий прибор для измерения скорости вращения. Конструкция тахометра изображена на рис. 2.8. Постоянный магнит A с помощью гибкого валика приводится во вращение устройством, скорость вращения которого необходимо определить. В соответствии с расположением магнита установлен алюминиевый диск 1. На валу диска 2 имеется противодействующая пружина 3. При вращении магнита A магнитный поток Φ пересекает диск и наводит в нем вихревые токи, которые, взаимодействуя с потоком Φ, создают вращающий момент $M_{\text{вр}}$, закручивающий пружину 3. При этом угол отклонений стрелки 4, укрепленной на валу прибора, пропорционален скорости вращения n приводного валика:

$$\alpha = f(n).$$

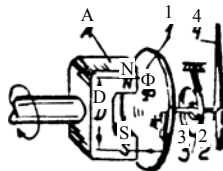


Рис. 2.8. Принцип устройства тахометра с вращающимся магнитным полем

Индукционный расходомер служит для измерения расхода электропроводной жидкости. Его устройство можно уяснить из схемы, показанной на рис. 2.9.

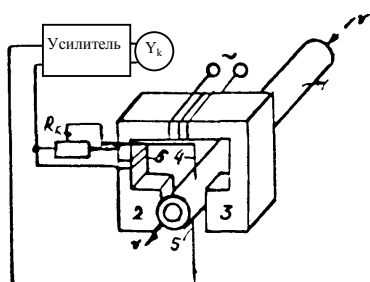


Рис. 2.9. Схема устройства индукционного расходомера

Между полюсами электромагнита 2 и 3 помещена труба 1 из немагнитного материала с площадью поперечного сечения S . Внутри трубы со скоростью v протекает электропроводная жидкость, расход которой необходимо замерить. В трубе вмонтированы электроды 4 и 5, включенные в цепь усилителя. На выходе усилителя имеется электроизмерительный прибор V_k , проградуированный в единицах расхода жидкости. ЭДС, возникающая между электродами, пропорциональна количеству жидкости, перекачиваемой через поперечное сечение трубы в зоне электродов:

$$E = kQ.$$

Компенсационное сопротивление R_k необходимо в измерительной цепи для создания падения напряжения, компенсирующего трансформаторную ЭДС E_T , которая возникает между электродами 4 и 5 при пересечении их переменным потоком силового поля электромагнита. Погрешность такого прибора лежит в пределах 1,0 – 2,5%.

Основными преимуществами индукционных расходомеров по сравнению с механическими является их безынерционность, независимость показаний от характеристик жидкости (плотности, вязкости) и отсутствие перепада давлений до и после счетного механизма.

Индукционный преобразователь для измерения параметров вибрации применяется для измерений: амплитуды колебаний, скорости и ускорения перемещения колеблющегося тела.

Индукционный преобразователь схематически изображен на рис. 2.10 и представляет собой цилиндрическую катушку 1, внутри которой на плоских пружинах подвешен постоянный магнит 3.

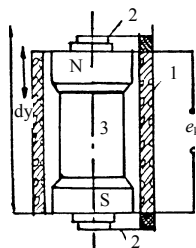


Рис. 2.10. Конструкция индукционного преобразователя для измерения параметров вибрации

Вся конструкция помещена в корпус, жестко скрепленный с объектом измерения. При колебании корпус с катушкой перемещается относительно неподвижного в пространстве магнита, при этом витки катушки пересекают магнитные силовые линии, и в катушке наводится электродвижущая сила e_k , пропорциональная скорости колебания объекта измерения.

Приборы, с помощью которых измеряется скорость колебаний, называются волосимерами.

Чтобы с помощью индукционного преобразователя измерить амплитуду колебаний, необходимо от скорости колебаний перейти к амплитуде перемещения путем интегрирования выражения для e_k . Физическое интегрирование e_k осуществляется с помощью специальной интегрирующей электрической цепи, составленной из емкости и сопротивления (рис. 2.11).

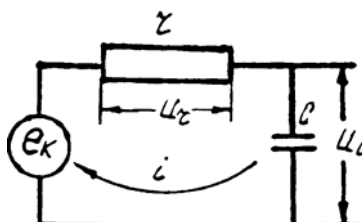


Рис. 2.11. Интегрирующая электрическая схема

Для этой схемы уравнение мгновенных значений ЭДС будет иметь вид:

$$e_k = U_r + U_c = ir + \frac{1}{C} \int idt + 2kdt.$$

Выбираем $r \gg x_c$, отсюда можно считать, что $U_r \gg U_c$

$$e_k \approx U_r = ir_{\Sigma},$$

тогда

$$i = \frac{l_k}{r},$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int e_k dt.$$

Следовательно, напряжение, снимаемое с емкости, оказывается пропорциональным координате перемещения y :

$$U_c = y.$$

Падение напряжения, снимаемое с сопротивления r , будет пропорционально ускорению колебания y .

Приборы для измерения амплитуды колебаний называются виброметрами, а для измерения ускорений – акселерометрами.

Рассмотренный выше принцип индукционного преобразования используется в частности в электродистанционном виброметре ЭДИВ-72, предназначенном для измерения амплитуд вибрационного смещения в вертикальном и горизонтальном направлениях с частотой вибрации не ниже 25 Гц. Он позволяет измерять амплитуды вибрационного смещения в пределах 1-200 мкм с точностью 10% для амплитуд выше 10 мкм. Электродистанционный виброметр, принципиальная монтажная схема которого изображена на рис. 2.12, состоит из: семи индукционных преобразователей (датчиков типа ВДВ-79 для измерения вертикальной составляющей, семи индукционных датчиков типа ВДГ-78 для измерения горизонтальной составляющей), пульта с переключателем и интегрирующей цепочкой и указателя в виде лампового вольтметра МВЛ-2М, магнитоэлектрический прибор которого разградуирован в единицах амплитуд перемещений (мкм).

Датчики устанавливаются на объекте измерения (например, на крышках подшипников или фундаментных рамах электрических машин) и соединяются с помощью переключателя, установленного на пульте.

Через интегрирующую цепь C можно поочередно подсоединять любой из датчиков к ламповому вольтметру, который имеет несколько диапазонов измерения. Виброметр ЭДИВ-72 широко используется при эксплуатации электроустановок.

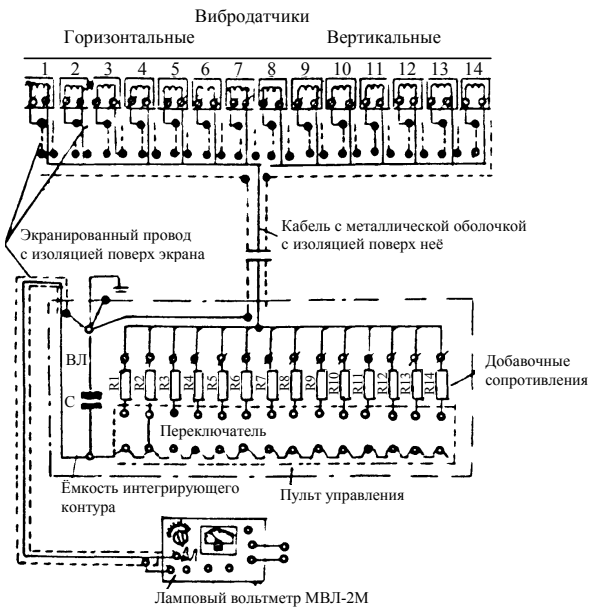


Рис. 2.12. Принципиальная монтажная схема электростанционного вибрметра

2.3. Ёмкостные преобразователи

Ёмкостные преобразователи представляют собой плоские или цилиндрические конденсаторы, ёмкость которых изменяется под воздействием неэлектрической величины.

Для плоского конденсатора ёмкость определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_a S}{\delta},$$

а для цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{2\pi l \epsilon_a}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора;
 S – площадь обкладок конденсатора;
 δ – расстояние между обкладками;
 l – длина активной части электродов цилиндрического конденсатора;
 d_1, d_2 – радиусы внутреннего и внешнего электродов цилиндрического конденсатора.

Ёмкостные преобразователи используются при измерении различных неэлектрических величин, функционально связанных с любым из изменяющихся параметров конденсатора ($\delta, S, \varepsilon_a, l$).

Рассмотрим несколько примеров применения ёмкостных преобразователей.

Ёмкостный преобразователь для измерения уровня жидкости, изображенный на рис. 2.13, выполняется в виде полого цилиндра со стержнем внутри, изолированным от стенок цилиндра. Стержень и стенки цилиндра образуют обкладки конденсатора. При частичном заполнении цилиндра водой его можно рассматривать как воздушно-водяной конденсатор, общая ёмкость которого равна

$$C = C_0 + C_1,$$

где C_0 – ёмкость воздушной части конденсатора;
 C_1 – ёмкость водяной части конденсатора.

Ёмкость преобразователя является функцией высоты (уровня) столба жидкости, заполняющей конденсатор:

$$C = f(l)$$

Включив выводы преобразователя в мостовую схему, можно измерить ёмкость C и, следовательно, отградуировать указатель в единицах уровня или объема жидкости в резервуаре, куда установлен преобразователь.

Помимо ёмкостных приборов мостового типа широкое применение находят и резонансные приборы. В них электрическая ёмкость включается параллельно с индуктивностью, образуя резонансный контур, который питается от высокочастотного генератора. Контур настроен на резонанс питающей частоты генератора при начальной ёмкости датчика, соответствующей наличию или отсутствию измеряемой среды на заданном уровне. С изменением уровня изменяется ёмкость датчика, что приводит к изменению частоты контура и нарушению условия резонанса, т. е. к срыву резонанса. При резонансе сопротивление контура минимальное, при срыве резонанса сопротивление контура резко увеличивается. На принципе изменения сопротивления контура при изменении контролируемого уровня построена электронная схема малогабаритного сигнали-

затора уровня МЭСУ, изображенного на рис. 2.13.

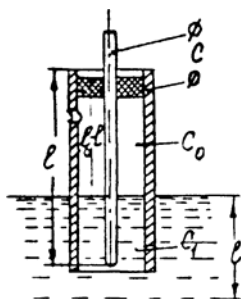


Рис. 2.13 Принцип устройства емкостного преобразователя для измерения уровня.

Прибор состоит из силового и электронного блоков с емкостным датчиком (рис. 2.14).

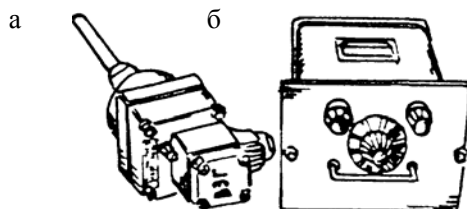


Рис. 2.14. Электронный сигнализатор МЭСУ: а — электронный блок; б — силовой блок

Силовой блок (рис. 2.15, а) состоит из трансформатора $Tr1$, предназначенного для питания электронного блока, и вентиля $D1$, собранного по однополупериодной схеме выпрямления для питания анодной цепи лампы $Л1$. В анодную цепь лампы включено электромеханическое реле $P1$ типа МКУ-48. Электронный блок (рис. 2.15, б) включает в себя генератор высокой частоты и емкостный датчик, представляющий собой электрод, покрытый изоляционным материалом — фторопластом. Если уровень ниже заданного предела, то ёмкость датчика меньше критической и прибор генерирует высокочастотные колебания. При этом ток в анодной цепи лампы и реле минимальный. При достижении средой заданного контролируемого уровня резко изменяется ёмкость датчика, возрастает ток в катушке реле $P1$, который переключает свои контакты в цепи сигнализации. Прибор настраивают на рабочем резервуаре, при этом оцен-

кой правильной работы является зажигание сигнальной лампы при прикосновении датчика с контролируемой средой. Ёмкость С3 является подстроечной ёмкостью контура (рис. 2.15, в).

С помощью таких приборов можно осуществлять световую и звуковую сигнализации контролируемых уровней, а также поддерживать постоянный уровень среды автоматической подпиткой резервуара рабочей жидкостью. Достоинствами ёмкостных преобразователей являются простота устройства, высокая чувствительность и малая инерционность. К недостаткам можно отнести малую выходную мощность, необходимость использования источников питания повышенной частоты.

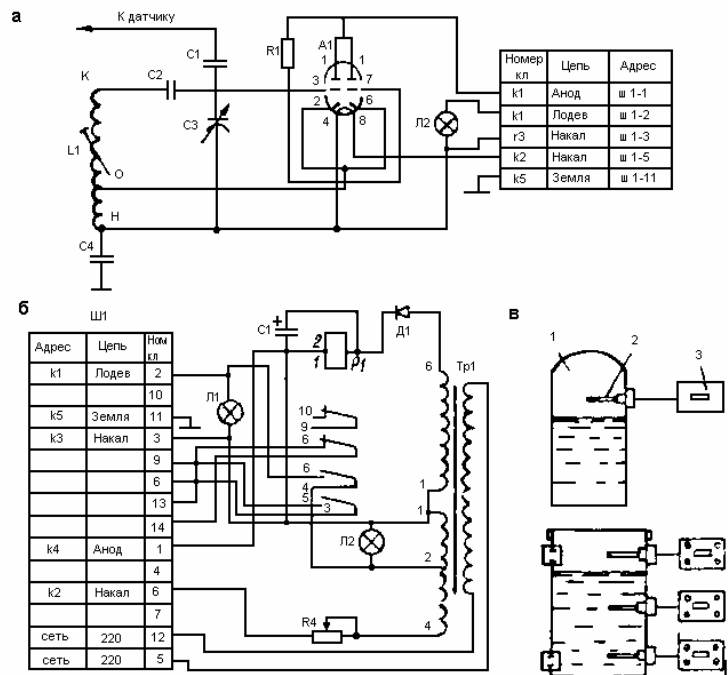


Рис. 2.15. Схема электронного сигнализатора МЭСУ: а – электронный блок; б – силовой блок; в – схема установки датчиков; 1 – ёмкость; 2 – датчик; 3 – электронный блок.

2.4. Пьезоэлектрические преобразователи

Принцип действия пьезоэлектрических измерительных преобразователей основан на пьезоэлектрическом эффекте, т. е. возникновении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков под действием механических сил или деформаций. При этом различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Прямой пьезоэлектрический эффект состоит в появлении электрических зарядов на гранях пьезоэлектриков при их сжатии или растяжении. При прекращении действия силы, приложенной к пьезоэлектрику, заряды на его гранях исчезают. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в изменении геометрических размеров пьезоэлектрика при введении его в электрическое поле.

В качестве пьезоэлектриков употребляют кварц, титанат бария сегнетову соль, дигидрофосфат аммония и другие диэлектрики. Наибольшее распространение получили кварцевые пьезоэлектрики.

Схема устройства пьезопреобразователя приведена на рис. 2.16. Преобразователь состоит: из двух пьезопластинок 1, расположенных так, чтобы их обращенные друг к другу грани имели заряды одного знака; из металлической прокладки 2; основания 3; нажимного устройства 4; изолятора 5; вывода 6. Под действием измеряемой силы F пьезопластины будут сжаты и на выводе 6 появится отрицательный потенциал, а на основании 3 положительный; отрицательный потенциал подается на сетку усилительной лампы.

Указатель прибора отградуирован в единицах силы F .

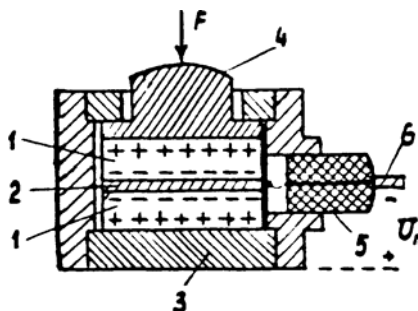


Рис. 2.16. Схема устройства пьезоэлектрического преобразователя

Пьезоэлектрические преобразователи применяются для измерения: силы, давления, перемещения и количества вещества.

Рассмотрим пример использования пьезоэлектрического преобразователя для измерения давления. Устройство пьезоэлектрического манометра для измерения давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания показано на рис. 2.17.

Преобразователь ввёртывается в цилиндр как запальная свеча. Газы через уплотнительную мембрану 1 давят на шток 2, который передаёт давление на пьезопластинку 3, разделённые металлической прокладкой 4. К прокладке 4 приварен изолированный вывод 5, вторым выводом служит корпус преобразователя 6. Пружина 7 поднимает пьезопластину, создавая постоянное давление. Это даёт возможность преобразователю реагировать не только на повышение давления перед мембраной 1, но и на разрежение в объёме испытываемого цилиндра. При разрежении давление пружины уменьшается, и разность потенциалов на выходе также уменьшается.

В рассмотренном преобразователе предусмотрено водяное охлаждение корпуса. Через трубку 9 и 10 вода подается в рубашку корпуса 8.

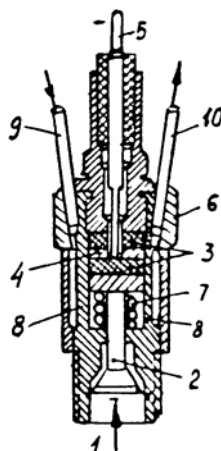


Рис. 2.17. Пьезоэлектрический манометр для измерения давления в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания

Изменение давления в цилиндре записывается электромеханическим осциллографом, вибратор которого соединяется с преобразователем через электронный усилитель. Основная погрешность пьезоэлектрического манометра не превышает $\pm 2\%$.

2.5. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрическими называются преобразователи, изменяющие свои электрические характеристики под воздействием светового потока, функционально связанного с измеряемой неэлектрической величиной. Принцип действия фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) основан на явлении фотоэлектрического эффекта, открытого русским ученым А. Г. Столетовым в 1888 году.

Фотоэлектрическим эффектом называется явление преобразования световой энергии в электрическую. Оно осуществляется тремя различными способами, в связи с чем различают три разновидности проявления фотоэффекта: внешний, внутренний и вентильный.

Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия), при котором кванты излучения оптического спектра (фотоны), проникая в вещество и отдавая ему свою энергию, вызывают выход электронов из поверхностного слоя вещества.

К промышленным типам фотоэлементов с внешним фотоэффектом принадлежат фотоэлементы типа ЦГ (кислородноцезиевый газонаполненный), типа СЦВ (сурьмяноцезиевый вакуумный) и типа ЦВ (кислородноцезиевый вакуумный).

Световые характеристики фотоэлементов с внешним фотоэффектом приведены на рис. 2.18 (для номинального напряжения 240 В).

В измерительной технике отдается предпочтение вакуумным фотоэлементам, обладающим меньшей по сравнению с газонаполненными инерционностью.

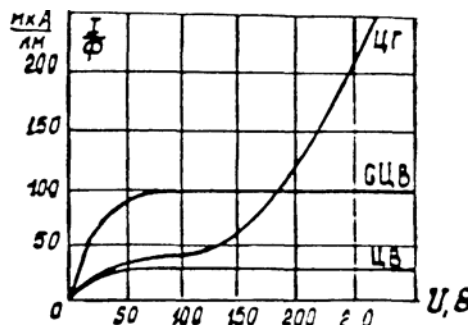


Рис. 2.18. Приведённые вольтамперные характеристики протяженных фотоэлементов с внешним фотоэффектом

Вакуумный фотоэлемент представляет собой двухэлектродную стеклянную лампу, из которой выкачан воздух. Анод лампы изготовлен в виде кольца. Катод является частью внутренней поверхности лампы. Он выполнен путём нанесения на нее слоя окисленного серебра, а затем тонкого слоя щелочноземельного металла цезия или химического соединения цезия и сурьмы.

При освещении катода кванты выбивают с его поверхности электроны, которые образуют вокруг катода электронное облако. Если на электроды лампы подать напряжение соответствующей полярности, то под действием электрического поля находящиеся в пространстве перед катодом электроны начнут двигаться к положительно заряженному катоду, образуя фотоэлектрический ток i_{ϕ} в замкнутой внешней цепи. Фототок i_{ϕ} будет возрастать при увеличении светового источника Φ . Зависимость фототока от светового потока $i_{\phi}=f(\Phi)$ называется световой характеристикой фотоэлемента.

В последнее время всё более широкое применение находят фотоэлектронные умножители, обладающие значительно большей чувствительностью, чем обычные фотоэлементы.

В фотоумножителях используется принцип фототока посредством вторичной эмиссии электронов эмиттерами, расположенными в самом фотоумножителе.

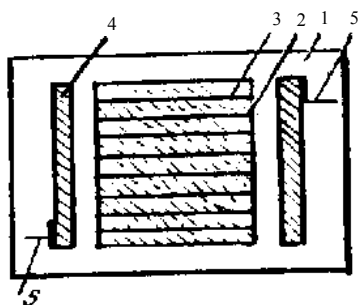
В многокаскадных усилителях коэффициент усиления может достигать весьма больших значений. Например, интегральная чувствительность фотоумножителя ФЭУ-1С с тринадцатью эмиттерами достигает 1-2 А/лм при напряжении питания, равном 800 В.

Внутренний фотоэффект (фотосопротивление), проявляется в том, что освобожденные под действием квантов света электроны не покидают вещество, из атомов которого они вырваны, а остаются внутри вещества, увеличивая тем самым электрическую проводимость.

Внутренний фотоэффект наиболее сильно выражен у таких полупроводников, как селен, сернистый таллий, сернистый висмут, сернистый свинец и других.

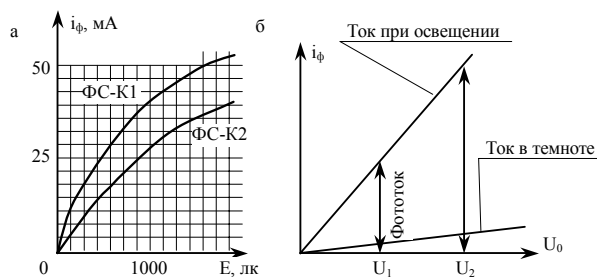
Фотосопротивление изготавливается в виде стеклянной пластинки 1 (рис. 2.19), с находящимися на ней на расстоянии долей миллиметра параллельными желобками 3, заполненными проводящим материалом (золотом, платиной). Желобки образуют две группы электродов, присоединённых к электродам 4, к которым припаяны выводы 5, а на поверхность пластины нанесён тонкий слой 2 полупроводящего материала. При воздействии на вещество полупроводника квантами света из атомов вещества выбиваются электроны. Но энергия, сообщаемая при этом электронам,

При включении такого фотозлемента в цепь с источником постоянного тока (рис. 2.20), сопротивление цепи будет зависеть от светового потока Φ , падающего на фотозлемент.



A circuit diagram showing a photovoltaic cell (PC) represented by a rectangle inside a circle. Two arrows labeled Φ point towards the cell, representing incident light. The cell is connected in series with a load (represented by a rectangle) and a battery (represented by a long and short vertical line). The battery has a '+' sign on the left and a '-' sign on the right.

Световые характеристики фотоспротивлений типа ФС-К1 и ФС-К2 (сернисто-кадмиевых) изображены на рис. 2.21.



При оценке фотосопротивлений пользуются понятием удельной чувствительности, отнесенной к 1В приложенного напряжения

$K_0 = 1$ мка/лм·В. Численные значения удельной чувствительности сернисто-свинцовых фотосопротивлений равны $K_0 = 400-500$ мка/лм·В, а сернисто-кадмиевых – $K_0 = 2500-3000$ мка/лм·В.

Вентильный фотоэффект заключается в появлении фото-ЭДС на границе некоторых полупроводников с металлами при воздействии на них светового потока. Существуют медно-закисные, сернисто-галлиевые, сернисто-серебряные и кремниевые вентильные фотоэлементы.

Кремниевый фотоэлемент (рис. 2.22) изготавливается в виде пластинки 4 из кремния, обладающего *n*-проводимостью. Пластинка обрабатывается парами треххлористого бора, в результате чего на ее поверхности образуется тонкий слой 1 кремния с *p*-проводимостью. На тыльную сторону пластинки на *n*-слой и *p*-слой напыляются металлические электроды 2 и 3. При освещении лицевой поверхности пластинки свет поглощается в поверхностном слое и в результате чего образуются пары электрон-«дырка».

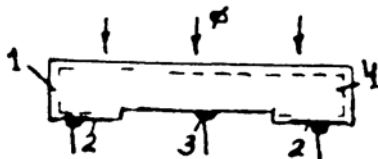


Рис. 2.22. Схема кремниевый фотоэлемента

Электроны и "дырки" перемещаются к *p-n*-переходу и на нем разделяются. Электроны свободно проходят через *p-n*-переход в кремний *n*-типа, заряжая пластинку отрицательно; "дырки" остаются в слое кремния *p*-типа, заряжая его положительно. Следовательно, между электродами 2 и 3 возникает разность потенциалов. При включении вентильного фотоэлемента в измерительную цепь, в ней будет протекать фототок, зависящий от величины светового потока. Световая характеристика фотоэлемента (рис. 2.23) линейна при коротком замыкании и нелинейна при нагрузке в цепи фотоэлемента. Напряжение холостого хода фотоэлемента может достигать величины 0,5–1 В при освещении его прямым солнечным светом. В режимах короткого замыкания фотоэлемент вырабатывает ток около 25 ма/см², чувствительность его достигает величины $K = 25$ ма/лм.

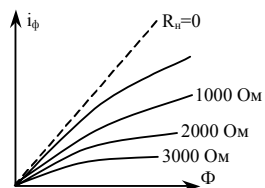


Рис. 2.23. Световые характеристики вентильного фотоэлемента

Фотоэлектрические преобразователи применяются для измерения различных неэлектрических величин. Рассмотрим для примера использование фотоэлектрического преобразователя в пирометрах – приборах для измерения температур от 400°С до 4000°С.

Принцип действия фотоэлектрического пирометра ФЭП-4 (рис. 2.24) заключается в том, что излучение от объекта измерения 12, вместе с излучением от эталонной лампы 4 в противогазе попадает на фотоэлемент 7. Разность этих световых потоков усиливается усилителем 8 и подаётся на выходной каскад 9, нагрузкой которого является эталонная лампа накаливания 4, последовательно с которой установлено калибровочное сопротивление 10. Падение напряжения на калибровочном сопротивлении изменяется электронным потенциометром II, шкала которого проградуирована в единицах измерения температуры.

Пирометр предназначен для измерения температуры от 500°С до 4000°С. Основная погрешность не превышает ±1%, при измерении температуры не выше 2000°С и 1,5% – при температуре свыше 2000°С.

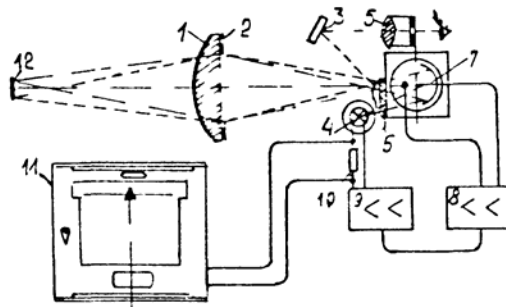


Рис. 2.24. Пирометр ФЭП-4: 1 – линза объекта, 2 – диафрагма, 3 – зеркало, 4 – лампа обратной связи, 5 – светофильтр, 6 – окуляр, 7 – фотоэлемент, 8 – усилитель, 9 – выходной каскад, 10 – калибровочное сопротивление, II – потенциометр, 12 – объект измерения температуры.

2.6. Термосопротивления

В термосопротивлениях (терморезисторах) используется зависимость сопротивления проводника или полупроводника как от температуры, так и от ряда физических величин, определяющих окружающую среду. На эту среду влияет ряд внешних и внутренних факторов:

- температура газовой или жидкой среды, самого проводника и арматуры;
- физические свойства среды (плотность, теплопроводность, вязкость);
- скорость движения газовой или жидкой среды;
- геометрические размеры проводника и форма арматуры, к которой крепится проводник.

Зависимость температуры проводника, а, следовательно, и его сопротивления, от перечисленных факторов можно использовать для измерения неэлектрических величин, характеризующих газовую или жидкую среду: температуры, скорости, концентрации, плотности, вакуума.

В преобразователях для измерения неэлектрических величин применяются проволоочные и полупроводниковые термосопротивления.

Наиболее распространены термосопротивления, выполненные из медной, платиновой и никелевой проволоки. Медь допускает нагрев не более чем до 200°C (во избежание окисления), платина до 1200°C без опасности окисления или расплавления, а никель до 250-300°C (при более высоких температурах зависимость сопротивления от температуры неоднозначна).

Устройство платинового термосопротивления показано на рис. 2.25.

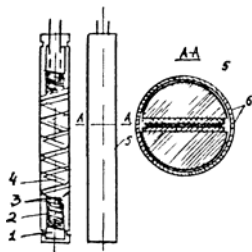


Рис. 2.25. Платиновое термосопротивление

Неизолированная платиновая проволока 2 диаметром 0,07 мм намотана бифилярно на каркас из слюды 1. К концам обмотки приварены выводы из толстой проволоки или ленты. Каркас с обмоткой зажат между двумя широкими пластинами 3, служащими для изоляции проволоки преобразователя. Пакет из слюдяных пластин скреплен серебряной

лентой 4 и вставлен в алюминиевый цилиндрический цоколь 5, защищающий обмотку преобразователя от механических повреждений.

Вкладыши 6 служат для уменьшения тепловой инерции. В целях защиты термосопротивления от воздействия внешней среды чехол вместе с обмоткой помещается в защитную арматуру различных модификаций.

Погрешность современных термометров сопротивления лежит в пределах 0,5-1%.

Полупроводниковые термосопротивления (рис. 2.26) (термисторы) имеют значительно большее удельное сопротивление, их температурный коэффициент обычно отрицателен и в 8-10 раз больше, чем у металлов (термисторы изготавливаются из смеси окислов различных металлов, например, CuO , CaO , MnO). В связи с этим термисторы могут иметь малые размеры при большом номинальном сопротивлении (до 10 мОм) и, следовательно, высокое быстродействие. Рабочий интервал температур у большинства полупроводниковых терморезисторов от -100 до $+300^\circ\text{C}$.

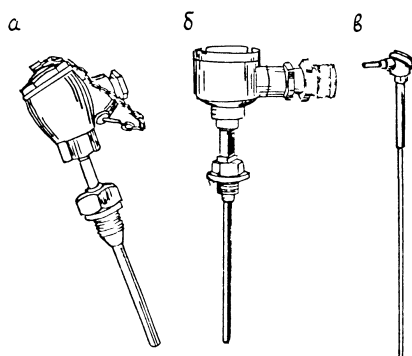


Рис. 2.26. Общий вид термометров сопротивления:
а – ТСП-175; б – ТСП-972; в – ТСП-0063.

Термисторы изготавливаются в виде стержней, шайб, дисков и бусинок. Миниатюрное термосопротивление типа МКМТ-16 бусинкового типа изображено на рис. 2.27. Оно представляет собой шарик диаметром около 0,2 мм с выводами из платиновой проволоки диаметром 0,05 мм, к концам которых приварены электроды из нихромовой проволоки. Корпус термосопротивления сделан из стекла.

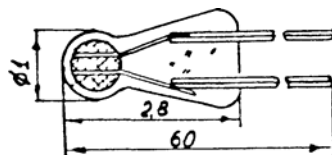


Рис. 2.27. Устройство термосопротивления МКМТ-16.

Терморезисторы совместно с измерительным устройством представляют собой термометр сопротивления. В термометрах сопротивления может быть использована любая электрическая схема, предназначенная для измерения сопротивления. Обычно преобразователь термометра сопротивления включают в плечо неуравновешенного одинарного моста с магнитоэлектрическим логометром в измерительной диагонали. Рассмотрим использование термометра сопротивления в сигнализаторе загазованности помещений.

Сигнализатор типа СВК-3М представляет собой автоматический непрерывно действующий прибор. Принцип действия прибора основан на определении теплового эффекта сгорания горючих газов и паров на поверхности чувствительных элементов, выполненных в виде цилиндров из оксидов алюминия, внутри которых установлена платиновая нить.

Устройство датчика сигнализатора типа СВК-3М показано на рис. 2.28.

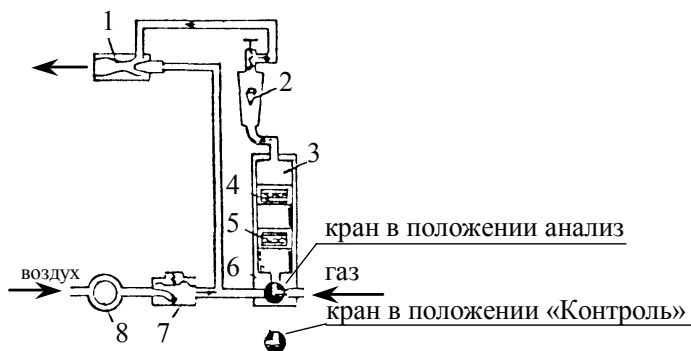


Рис. 2.28. Устройство датчика сигнализатора типа СВК – 3М

Эжектор 1, запитанный давлением сжатого воздуха через фильтр 8 и

редуктор 7, под действием разряжения пропускает через датчик 3 анализируемый газ, расход которого контролируется ротаметром 2. Двухходовой кран 6 переключается в два положения: "анализ", при котором контролируется загазованность помещения, и «контроль», при котором производится проверка нуля прибора по воздуху.

Электрическая схема датчика анализатора загазованности (рис. 2.29) имеет измерительный мост, состоящий из четырёх сопротивлений. Сопротивления $R1$ и $R2$ являются чувствительными элементами.

Через измерительный элемент $R1$ пропускается контролируемая газовая среда при строго определённом расходе, равном 42 л/ч. Сопротивление $R2$ является сравнительным элементом, который герметично закрыт и расход контролируемой среды через элемент отсутствует. Сопротивления $R3$ и $R4$ представляют собой постоянные резисторы, выполненные из магнитного провода ($R3=R4=65\pm0,1$ Ом).

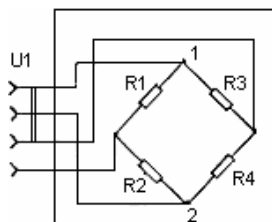


Рис. 2.29. Электрическая схема датчика газоанализатора типа СВК

При появлении горючих газов в воздухе контролируемого помещения на рабочем чувствительном элементе $R1$ происходит окисление горючего газа, при этом повышается температура элемента, и электрическое сопротивление платиновой спирали увеличивается. Нарушается условие равновесия измерительного моста и в измерительной диагонали моста возникает разность потенциалов, пропорциональная объемной концентрации горючего газа.

Для усиления сигнала применяется двухкаскадный усилитель, нагрузкой которого является измерительный стрелочный прибор, показывающий загазованность помещения.

2.7. Термоэлектрические преобразователи

Действие термоэлектрических преобразователей основано на возникновении термо-ЭДС при нагреве или охлаждении спая двух разно-

родных металлов или полупроводников. Термоэлектрический измерительный прибор, состоящий из двух термоэлектродов, является рабочим концом термопары, два других её свободных конца подключаются к измерительному прибору – милливольтметру или потенциометру (рис. 2.30).

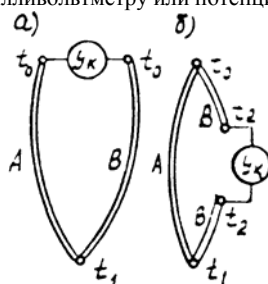


Рис. 2.30. Включение указателя в термоэлектрическую цепь

Обычно градуировка термоэлектрических преобразователей производится при температуре свободных концов, равной 0°C , поэтому при применении термоэлектрических термометров в результате измерения вводится поправка. Применяются методы автоматического введения поправки на температуру свободных концов.

Наиболее широко применяются при измерении высоких температур термопары платино-радий-платиновые, хромель-алюмелевые, хромель-копелевые.

В табл. 2.2. приведены характеристики некоторых термопар, применяемых в измерительных приборах.

Таблица 2.2

Наименование термопар	Термо-ЭДС при $t_1=100^{\circ}\text{C}$ $t_0=0^{\circ}\text{C}$ мВ	Верхний предел измеряемой температуры, $^{\circ}\text{C}$	
		при длительном измерении	при кратковременном измерении
Медь-копель	4,75	350	500
Железо-копель	5,75	600	800
Хромель-копель	8,90	600	800
Хромель-алюмель	4,10	1100	1250

Конструктивно термоэлектрические преобразователи для измерения температуры (рис. 2.31) выполняются в виде защитной стальной трубки 1, внутрь которой помещены термоэлектроды 6 в фарфоровых бусах 2. Рабочий спай 3 термопары изолирован от корпуса фарфоровым наконечником 4.

Корпус термопары укреплен на фланце 5. Через головку термопары вводятся соединительные провода и подключаются к зажимам 7.

Промышленные термопары изготавливаются длиной от 300 до 2000 мм. Основная погрешность термопар при изменении температуры не превышает 1% от измеряемой величины.

В качестве указателей в приборах с термоэлектрическими преобразователями используются магнитоэлектрические милливольтметры, а также применяются мостовые и компенсационные измерительные схемы.

Контрольные вопросы:

1. Из каких самостоятельных узлов состоят приборы измерения электрических величин?
2. Какие основные характеристики имеет преобразователь неэлектрических величин?
3. Охарактеризуйте методы измерения неэлектрических величин.
4. Как классифицируются преобразователи неэлектрических величин?
5. Объясните устройство, принцип действия и область применения преобразователей неэлектрических величин:
реостатных;
тензосопротивлений;
индукционных;
емкостных;
пьезоэлектрических;
фотоэлектрических;
термосопротивлений;
термоэлектрических.
6. Поясните конструктивное устройство:
виброметра ЭДИВ-72;
пирометра ФЭП-4;
электрического бензинометра;
манометра с тензометрическим преобразователем;
индукционного тахометра;
электронного сигнализатора МЭСУ;
датчика сигнализатора СВК-3;
7. Какие погрешности вносятся в измерения преобразователями неэлектрических величин?

Литература

1. Фремке А. В. , Душин Е. М. Электрические измерения. – Л.: Энергия, 1980.
2. Фарзани Н. Г. и др. Технологические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1989.
3. Жарковский Б. И. Приборы автоматического контроля и регулирования. – М.: Высшая школа, 1989.
4. Сацукевич М. Ф. Измерительные приборы и их использование. – Минск.: Беларусь, 1987.
5. Котур В. М. и др. Электрические измерения и электроизмерительные приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные понятия. Классификация преобразователей неэлектрических величин.....	3
2. Конструктивное устройство, принцип действия и область применения преобразователей неэлектрических величин.....	6
2.1. Резистивные преобразователи.....	6
2.2. Индуктивные преобразователи.....	12
2.3. Емкостные преобразователи.....	17
2.4. Пьезоэлектрические преобразователи.....	21
2.5. Фотоэлектрические преобразователи.....	23
2.6. Термосопротивления.....	28
2.7. Термоэлектрические преобразователи.....	31
Контрольные вопросы.....	33
Литература.....	34

Анатолий Григорьевич Сошинов

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
Учебное пособие

Редакторы Л. В. Попова
М. И. Просондеев

Темплан 2002 г., поз. № 169.
Лицензия ИД № 04790 от 18.05.01.

Подписано в печать . Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. .
Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ .

Волгоградский государственный технический университет
400131 Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28.
РПК «Политехник»
Волгоградского государственного технического университета
400131 Волгоград, ул. Советская, 35.