

Г. Виглеб

Датчики

Устройство и применение

Перевод с немецкого
канд. физ.-мат. наук
М. А. Хацернова



Москва «Мир» 1989

СОДЕРЖАНИЕ

От переводчика	5
Предисловие	8
Глава 1. Основные сведения	9
1.1. Датчик... Что это такое?	9
1.2. Микро-ЭВМ и сенсорика	11
1.3. Технология изготовления датчиков	11
Глава 2. Датчики температуры	14
2.1. Датчики температуры из платины и никеля	15
2.2. Термопары	23
2.3. Кремниевые датчики температуры	26
2.4. Терморезисторы с отрицательным ТКС	37
2.5. Терморезисторы с положительным ТКС	46
2.6. Измерение разности температур	58
2.7. Калибровка	59
Глава 3. Датчики давления	62
3.1. Кремниевые датчики	62
3.2. Электронный барометр	71
3.3. Высотомер	75
Глава 4. Датчики расхода и скорости	77
4.1. Терморезисторный анемометр	79
4.2. Датчик расхода	82
4.3. Датчик направления	88
Глава 5. Газовые датчики	91
5.1. Термокондуктометрические ячейки	91
5.2. Топливная ячейка	94
5.3. Термохимическая (кatalитическая) ячейка	95
5.4. Полупроводниковые датчики	99

Глава 6. Датчики влажности	113
6.1. Основные определения	113
6.2. Конденсационный гигрометр на основе хлорида ли- тия	114
6.3. Емкостные датчики влажности	116
6.4. Измерительные схемы	120
6.5. Калибровка	124
Глава 7. Датчики магнитного поля	126
7.1. Магниторезистивные датчики	126
7.2. Датчики Холла	128
7.3. Датчики Виганда	130
Глава 8. Оптические датчики	132
8.1. Датчики положения	143
8.2. Датчики изображения на основе приборов с заря- довой связью (ПЗС)	150
8.3. Датчик шероховатости	159
8.4. Датчики ИК-излучения	162
8.5. Волоконно-оптические датчики	168
Глава 9. Области применения датчиков	174
9.1. Датчики в промышленной технике измерений	174
9.2. Датчики в робототехнике	177
9.3. Датчики в автомобиле	179
9.4. Датчики в бытовых приборах	184
Литература	189
Список фирм — изготовителей датчиков	192

ББК 32.965.39
Б41
УДК 621.084.2

Виглеб Г.
Б41 Датчики: Пер. с нем.— М.: Мир, 1989.—
196 с., ил.
ISBN 5-03-000634-6

Книга автора из ФРГ представляет собой популярный обзор устройства и применения современных датчиков, в том числе датчиков температуры, давления, параметров светового излучения, характеристик газов и жидкостей. Приведены многочисленные примеры конструкций выпускаемых промышленностью датчиков, а также схемных решений как основы автоматизации и компьютеризации различных процессов. Продемонстрированы возможности использования датчиков в промышленности и бытовой технике.

Для широкого круга читателей: конструкторов-любителей, студентов вузов и техникумов, а также специалистов смежных областей.

В 2402020000—137
041(01)—89 130—89

ББК 32.965.39



Редакция литературы по электронике

ISBN 5-03 000634-6 (русск.) © 1986 Franzis-Verlag GmbH,
München

ISBN 3-7723-8111-1 (нем.) © перевод на русский язык, «Мир»,
1989

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, в научных исследованиях, в быту. Однако реализация этой предпосылки в значительной мере определяется возможностями устройств для получения информации о регулируемом параметре или процессе. Описанию таких устройств — датчиков — и посвящена данная книга. Разумеется, применение датчиков не ограничивается только автоматизированными системами, поскольку они могут выполнять также функции элементов просто измерительных систем.

По определению одного из основоположников современной отечественной техники измерения физических величин А. М. Туричина (1966 г.) к датчикам относятся все основные узлы электронной схемы для измерения неэлектрических величин, расположенные непосредственно у объекта. Необходимость преобразования измеряемой неэлектрической величины в адекватный ей электрический сигнал послужила позднее основанием для введения термина «измерительный преобразователь», рекомендованного государственной системой обеспечения единства измерений вместо термина «датчик». Имея в виду это обстоятельство, мы все же сохранили в переводе книги термин «датчик», на наш взгляд, точнее соответствующий оригиналу.

В русле общего направления технического прогресса существенные изменения претерпели также и датчики. На смену электромеханическим и электро-

6 От переводчика

вакуумным устройствам пришли твердотельные (полупроводниковые, сегнетоэлектрические и т. п.) элементы и приборы, которые затем все больше и больше стали вытесняться интегральными схемами. Развитие техники детектирования магнитных и электрических полей, электромагнитных волн (от ИК- до УФ-диапазона), малых количеств примеси в жидких и газообразных средах существенно расширили возможности измерений на удаленных, труднодоступных, движущихся и т. п. объектах. Это сделало не обязательным расположение датчиков непосредственно у объекта.

Общие тенденции к миниатюризации и компьютеризации коснулись, безусловно, и рассматриваемой области техники. При этом сигнал датчика, в большинстве случаев аналоговый, для обработки в микропроцессоре или микро-ЭВМ должен быть представлен в цифровом виде. Это осуществляется обычно интерфейсным устройством, включающим в себя АЦП. В последнее время наряду с созданием датчиков, имеющих цифровой выходной сигнал, наблюдается тенденция к конструктивному объединению датчиков с микропроцессорными устройствами.

Совершенствование полупроводниковой технологии позволило также расширить сферы применения датчиков и к тому же повысить их точность, быстродействие, надежность, долговечность, удобство сопряжения с электронными измерительными схемами. Массовый характер производства датчиков способствует снижению их цены, что также является немаловажным фактором, определяющим их внедрение в практику.

В свете изложенного предлагаемая читателю книга Г. Виглеба служит хорошим пособием для вводного ознакомления с проблемой, в обобщенном виде называемой «сенсорикой» (от англ. *sense* — ощущать, воспринимать). Сенсорика рассматривает технику конструирования, изготовления и применения датчиков. В доступной и наглядной форме здесь изложены физические принципы и практическое устройство широкого спектра датчиков различного назначения. Ос-

новное внимание при этом уделено их современным разновидностям на основе полупроводниковых материалов и приборов. Хорошо иллюстрированная, с большим количеством конкретных данных эта книга дает ясное представление о конструктивных параметрах датчиков, их характеристиках, возможных сферах применения.

Она удачно восполняет существующий пробел в отечественной популярной технической литературе по рассматриваемому вопросу. Наиболее близкая к ней тематически книга Л. А. Осиповича (Датчики физических величин. — М.: Машиностроение, 1979 г.) рассчитана на специалистов и к тому же не содержит сведений о некоторых видах датчиков, описанных в книге Г. Виглеба. Можно отметить также близкую ей по характеру изложения и подходу книгу Н. Како и Я. Яманэ (Датчики и микро-ЭВМ: Пер. с япон. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986), однако в ней основное внимание уделено технике микро-ЭВМ и сопряжению их с датчиками и исполнительными механизмами (технике интерфейса). Поэтому по тематической направленности, объему и уровню изложения книга Г. Виглеба отличается несомненной индивидуальностью. Конечно, она не носит справочного характера и ни в коей мере не может претендовать на полноту отражения имеющихся данных по рассматриваемому вопросу. Тем не менее содержащиеся в ней сведения представлены достаточно систематично и наглядно.

Книга представляется полезной для учащихся техникумов и студентов вузов, специалистов смежных областей, а также для широкого круга радиолюбителей и лиц, интересующихся современным состоянием техники. Как справедливо отмечает автор, чтение книги должно побуждать читателя к самостоятельному творчеству, будь то индивидуальное радиолюбительство или решение производственных задач.

M. Хацернов

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы в технике измерения и регулирования параметров различных процессов в самостоятельную отрасль выделилось изготовление и применение датчиков. Эта отрасль, постоянно развиваясь, служит основой создания разнообразных вариантов систем автоматического регулирования.

Такое развитие обусловлено прежде всего гигантским прогрессом микроэлектроники. Широкий спектр применений микро-ЭВМ в бытовой технике, автомобилестроении и других отраслях промышленности все в большей мере требует недорогих датчиков, выпускаемых крупными сериями. Как следствие этого появились интересные и в то же время недорогие устройства на датчиках, ряд которых представлен в данной книге.

Предлагаемая книга имеет целью не только помочь читателю в обращении с датчиками, но и пробудить у него желание самому создавать схемы с использованием серийно выпускаемых датчиков.

При описании некоторых датчиков (датчиков температуры, давления, оптических датчиков) на передний план выдвинуты некоторые специфические вопросы (миниатюризация, новые технологии). Кратко описаны также общие принципы электрических чувствительных элементов, насколько это было необходимо для понимания работы датчиков.

Г. Биглеб

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Техника конструирования и применения датчиков, или, как ее можно кратко назвать, сенсорика, за последние годы развилась в самостоятельную ветвь измерительной техники. С ростом автоматизации к датчикам физических параметров стали предъявляться все более высокие требования. При этом особое значение придается следующим показателям:

- миниатюрность (возможность встраивания),
- дешевизна (серийное производство) и
- механическая прочность.

По структурному построению автоматизированные устройства напоминают такие биологические системы, как, например, человек. На рис. 1.1 проведена аналогия между человеком и автоматом по способам получения сигналов, их обработки и накопления, а также по преобразованию сигналов. Органам чувств человека соответствуют в автоматах (или роботах, см. разд. 9.2) датчики, а функции активных органов выполняются исполнительными устройствами. Аналогом мозга как центрального устройства для обработки сигналов служит ЭВМ с ее системой памяти.

1.1. Датчик... Что это такое?

Понятием «датчик» в общем случае обозначают дешевый, но надежный приемник и преобразователь измеряемой величины, обладающий умеренной точностью и пригодный для серийного изготовления. Общеупотребительные термины и определения для различных датчиков четко сформулированы в Инструкции 2600 Общества немецких инженеров и Общества немецких электриков ФРГ (VDI/VDE-Richtlinie 2600). Типичное устройство датчика показано на рис. 1.1.1.

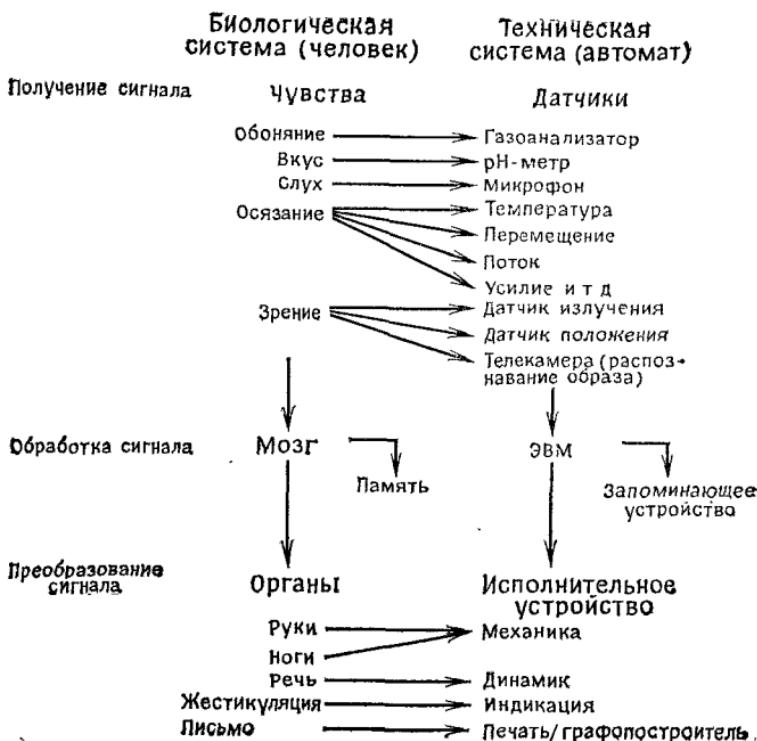


Рис. 1.1. Аналогия между процессами получения, обработки и преобразования сигналов в биологических (человек) и технических (автомат) системах.

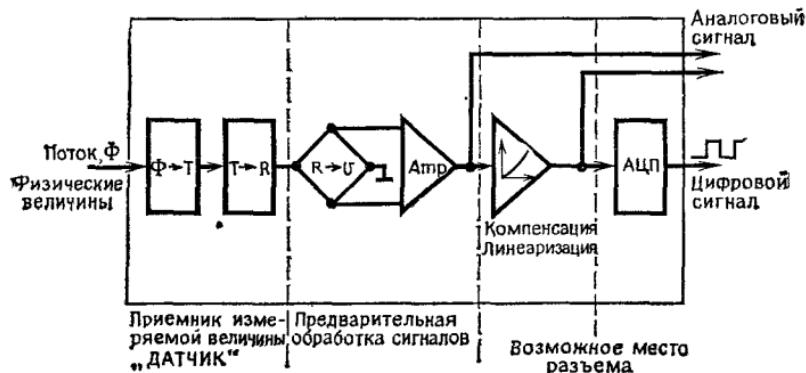


Рис. 1.1.1. Устройство воспринимающей системы с получением, обработкой и преобразованием сигнала: $\Phi \rightarrow T$ — первичный процесс; $T \rightarrow R$ — вторичный процесс; $R \rightarrow U$ — измерительный мост, согласование сигналов; Amp — усилитель.

1.2. Микро-ЭВМ и сенсорика

Сочетание датчик — ЭВМ — исполнительное устройство представляет собой информационную систему. Для упрощения сопряжения датчика с микро-ЭВМ была бы предпочтительна выдача датчиком цифровой информации. Но, к сожалению, в природе и технике информация существует в основном в виде аналоговых величин, которые для обработки сигнала в



Рис. 1.2.1. Информационная система, включающая в себя датчик в качестве пассивного чувствительного элемента (получение сигнала) и исполнительные устройства в качестве активных преобразователей сигнала.

ЭВМ должны быть трансформированы в цифровые с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Полная информационная система представлена на рис. 1.2.1. Здесь показано прохождение сигнала от его возникновения в датчике с последующей обработкой в ЭВМ и до выхода к исполнительным устройствам.

1.3. Технология изготовления датчиков

Технология изготовления датчиков чаще всего определяется известными способами изготовления полупроводниковых интегральных схем. Общее представление об этих способах изготовления с их достоинствами и недостатками дает табл. 1.3.1.

Таблица 1.3.1.

Основные виды технологий изготовления объемных и пленочных датчиков, совместимых с микроэлектроникой

	Кремниевая технология	Тонкопленочная технология	Толстопленочная технология
Входные величины	Удлинение (тензодатчики) Температура Магнитное поле Свет, ИК-излучение (Состав и концентрация газа)	Удлинение (тензодатчики) Температура Магнитное поле Свет, ИК-излучение (Емкость) (Состав и концентрация газа)	(Удлинение (тензодатчики)) Температура (Магнитное поле) Емкость
Воспроизводимость (однородность продукции)	Низкая — средняя	Высокая (при использовании лазерной доводки — очень высокая)	Средняя — низкая (при использовании лазерной доводки — высокая)
Стабильность	Высокая	Очень высокая	Высокая
Температурный диапазон	До 150 °C (ограничен кремнием)	Может быть очень большим (например, у датчиков температуры: от -50 °C до +600 °C)	Примерно до 400 °C
Возможность миниатюризации	Очень хорошая	Хорошая	Средняя

Возможность встраивания	На одном кристалле (монолитно) в виде ИС	На одной подложке (гибридная технология)	На одной подложке (гибридная технология)
Рентабельный объем производства (шт./год)	Выше 10^5	$10^3 \dots 10^5$ (10^6)	$10^2 \dots 10^4$
Капитальные затраты на разработку и производство (в марках ФРГ)	Более 1 млн.	Более 500 тыс.	Около 100 тыс.
Затраты на один датчик при массовом производстве	Очень низкие	Низкие	Низкие
То же при мелкосерийном производстве	Очень высокие	Высокие	Низкие
Затраты на исследования и разработку	Высокие; требуется НИОКР (научный персонал)	Очень высокие; требуется НИОКР (научный персонал)	Средние; в общем случае необходимы только ОКР
Возможность вариаций в ходе разработки (гибкость)	Низкая	Высокая	Низкая

ГЛАВА 2

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Важнейшей разновидностью датчиков являются датчики температуры, поскольку многие процессы, в том числе и в повседневной жизни, регулируются температурой, например:

- регулирование отопления на основании измерения температуры теплоносителя на входе и выходе, а также температуры в помещении и наружной температуры;
- регулирование температуры воды в стиральной машине;
- регулирование температуры электроутюга, электроплитки, духовки и т. п.

Кроме того, путем измерения температуры можно косвенно определять и другие параметры, например поток, уровень и т. п.

При использовании такого рода датчиков температура измеряется, как правило, на основании зависимости электрического сопротивления от температуры. В зависимости от того, возрастает или понижается электросопротивление датчика при повышении температуры, различают полупроводниковые датчики соответственно с положительным или отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС)*. Металлические датчики температуры из никеля или платины всегда обладают положительным ТКС. В случае датчиков на основе термопар возникает ЭДС, пропорциональная температуре.

* Терморезисторы с положительным или отрицательным ТКС в схемах данной книги обозначаются как *PTC* или *NTC*, а также ϑ^+ и ϑ^- соответственно. — Прим. перев.

2.1. Датчики температуры из платины и никеля

Для точного измерения температуры в диапазоне от -200 до $+850^{\circ}\text{C}$ чаще всего применяются датчики температуры из никеля или платины. Электрическое сопротивление металлических проводников изменяется согласно уравнению

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha (T_1 - T_0)],$$

где R_0 — сопротивление при 0°C (т. е. при 273 K), R_1 — сопротивление при температуре T_1 , α — темп-

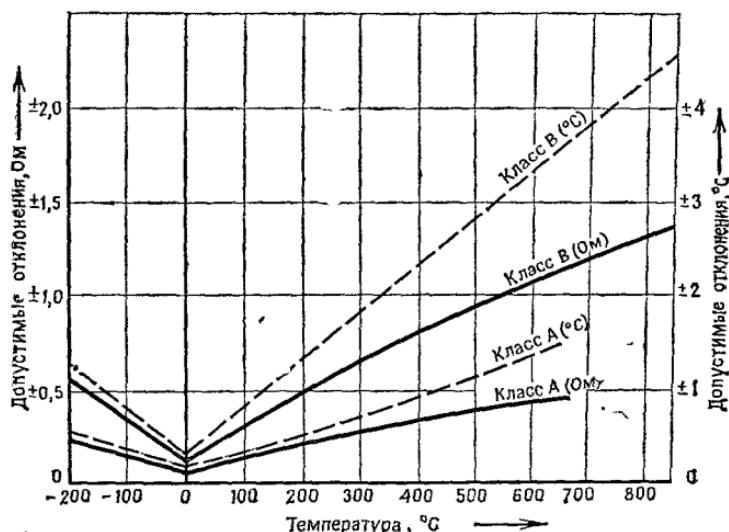


Рис. 2.1.1. Допустимые отклонения значений сопротивления и температуры для измерительных резисторов согласно требованиям стандарта ФРГ DIN 43760.

ратурный коэффициент, равный для платины $3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и для никеля $5,39 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Сопротивление при 0°C в большинстве случаев выбирается равным 100 Ом. Такие измерительные резисторы обозначают Pt-100 или Ni-100. Употребительны также стандартно изготавляемые сопротивления в 500 Ом и 1 кОм. Допустимые отклонения от этих значений в пересчете на градусы по шкале

16 Глава 2

Цельсия, установленные стандартом ФРГ DIN 43760, составляют

- для класса А: $\pm(0,15 + 0,002 T)^\circ\text{C}$,
- для класса В: $\pm(0,3 + 0,005 T)^\circ\text{C}$,

где температура T выражена в градусах Цельсия. Эта зависимость графически представлена на рис. 2.1.1.

Таблица 2.1.1.

Измеряемая температура, $^\circ\text{C}$	Допустимые отклонения			
	Класс А		Класс В	
	Ом	$^\circ\text{C}$	Ом	$^\circ\text{C}$
-200	$\pm 0,24$	$\pm 0,55$	$\pm 0,56$	$\pm 1,3$
-100	$\pm 0,14$	$\pm 0,35$	$\pm 0,32$	$\pm 0,8$
0	$\pm 0,06$	$\pm 0,15$	$\pm 0,12$	$\pm 0,3$
100	$\pm 0,13$	$\pm 0,35$	$\pm 0,30$	$\pm 0,8$
200	$\pm 0,20$	$\pm 0,55$	$\pm 0,48$	$\pm 1,3$
300	$\pm 0,27$	$\pm 0,75$	$\pm 0,64$	$\pm 1,8$
400	$\pm 0,33$	$\pm 0,95$	$\pm 0,79$	$\pm 2,3$
500	$\pm 0,38$	$\pm 1,15$	$\pm 0,93$	$\pm 2,8$
600	$\pm 0,43$	$\pm 1,35$	$\pm 1,06$	$\pm 3,3$
650	$\pm 0,46$	$\pm 1,45$	$\pm 1,13$	$\pm 3,6$
700	—	—	$\pm 1,17$	$\pm 3,8$
800	—	—	$\pm 1,28$	$\pm 4,3$
850	—	—	$\pm 1,34$	$\pm 4,55$

В табл. 2.1.1 приведены допустимые отклонения для различных температур. Отклонения в градусах Цельсия справедливы для всех номиналов сопротивлений, а отклонения в омах — только для сопротивлений типа Pt-100. Для других номиналов сопротивлений значения отклонений в омах следует умножать на коэффициент $R_0 \cdot 10^{-2}$.

Измерительные схемы

Для измерения температуры датчик нужно подключить к измерительной схеме, на выходе которой формируется напряжение, пропорциональное температуре. Простейшей разновидностью такой схемы яв-

ляется измерительный мост (или мост Уитстона) (рис. 2.1.2).

Если сопротивление сравнения R_V установить таким образом, что измерительный прибор G будет показывать отсутствие тока, то оказывается справедливым равенство $R_V = R_{Th}$, поскольку верхние параллельные сопротивления равны между собой. Преимущество такого способа измерения заключается в независимости результатов от напряжения питания. Для технических измерений, когда нужно иметь непосредственные показания температуры, сопротивление R_V можно принять постоянным, а показания измерительного прибора прокалибровать.

В случае измерения напряжения оно получается равным

$$U_M = U_B \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_V}{R_V + R_{Th}} \right].$$

При этом нужно использовать высокоомный вольтметр, так как между точками 1 и 2 не должен протекать ток.

Если же применяется низкоомный амперметр, то между точками 1 и 2 возникает ток короткого замыкания, определяемый выражением

$$I_K = I_S \left[\frac{R_1 R_{Th}}{R_1 + R_V} - \frac{R_2 R_V}{R_2 + R_{Th}} \right],$$

где I_S — ток питания.

Практически применимая схема показана на рис. 2.1.3. Измерительный ток I_S должен быть очень мал, чтобы не вызывать нагревание резистора R_{Th} , которое может привести к ошибкам измерения. Эта так называемая погрешность самонагрева зависит от подводимой электрической мощности ($P = I^2 R$),

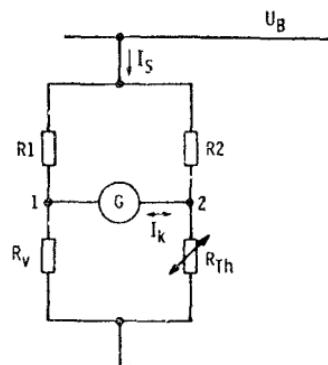


Рис. 2.1.2. Простая измерительная схема (мост Уитстона) для терморезисторов (например, Pt-100).

величины отводимого тепла и приборной постоянной EK , называемой коэффициентом самонагрева. Обусловленное самонагревом повышение температуры ΔT можно рассчитать по формуле

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{P}{EK},$$

где T_1 и T_2 — значение температуры при наличии и отсутствии измерительного тока I_s соответственно, P — подводимая к измерительному сопротивлению мощность (в милливаттах), EK — коэффициент самонагрева ($\text{мВт}/^{\circ}\text{C}$).

Обычно величину EK как характеристику датчика указывают для измерений в воде и воздухе.

Пример

При измерении температуры воздуха датчиком типа W60/24 (фирма Degussa-Hanau) применена схема, показанная на рис. 2.1.3.

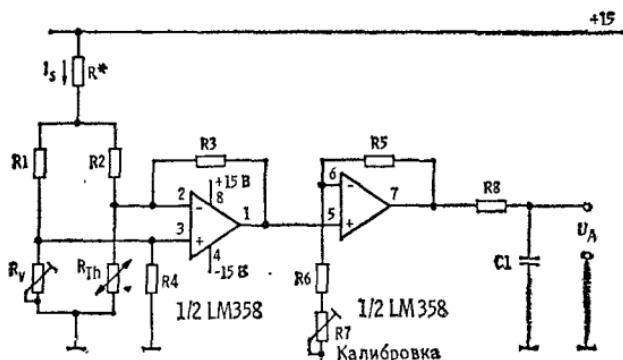


Рис. 2.1.3. Принципиальная схема прибора для измерения температуры.

При 0°C имеем $R_1 = R_2 = R_v = R_{th} = 100 \text{ Ом}$. Коэффициент EK для Pt-100 (W60/24) равен $4 \text{ мВт}/^{\circ}\text{C}$.

При необходимости измерения с погрешностью не более $0,25^{\circ}\text{C}$ через датчик должен протекать измерительный ток, равный лишь

$$I = \sqrt{1 \text{ мВт}/100 \text{ Ом}} \approx 3 \text{ мА.}$$

Следовательно, ток I_s должен быть равен 6 мА, а соответствующее ему добавочное сопротивление

$$R^* = \frac{15 \text{ В}}{6 \text{ мА}} - 100 \text{ Ом} = 2,4 \text{ кОм.}$$

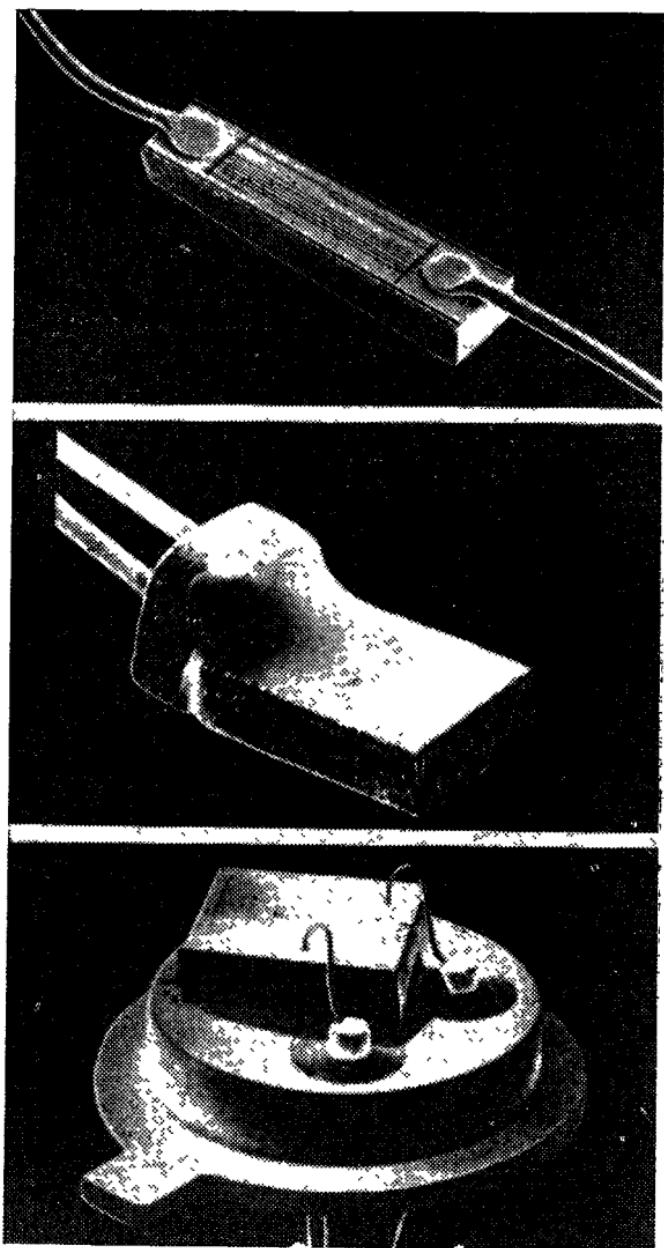
Сигналы измерительного моста с помощью мостикового усилителя тока преобразуются в напряжение. При этом сопротивления R_3 и R_4 должны быть выполнены в виде 0,1 %-ных металлокленочных резисторов. В зависимости от типа датчика R_3 и R_4 находятся в диапазоне от 1 до 50 кОм. Калибровка измерительной схемы осуществляется с помощью потенциометра R_7 , во втором, неинвертирующем каскаде усилителя. Коэффициент усиления этого каскада определяется сопротивлениями R_5 , R_6 и R_7 . При $R_5 = R_7 = 1 \text{ МОм}$ и $R_6 = 100 \text{ кОм}$ измерительный сигнал можно усилить еще примерно в 10 раз. Резистор R_8 и конденсатор C_1 формируют RC -цепочку для фильтрации и демпфирования сигнала. Типичными параметрами являются $R_8 \approx 10 \text{ кОм}$ и $C_1 \approx 4,7 \text{ мкФ}$.

Настройка схемы осуществляется следующим образом.

1. Определить R^* по заданному ЕК.
2. Влить R^* и проверить I_s путем измерения падения напряжения на R^* .
3. Погрузить датчик температуры R_{th} в ванну с тающим льдом.
4. Регулировочным потенциометром R_V установить напряжение U_A на нуль.
5. Датчик температуры R_{th} погрузить в ванну с кипящей водой ($T \rightarrow 100^\circ\text{C}$).
6. Регулировочным потенциометром R_7 установить выходное напряжение U_A на 1 В.

Если чувствительность недостаточна, то сопротивления R_3 и R_4 следует увеличить. При слишком высокой чувствительности эти сопротивления следует уменьшить.

В качестве R_{th} можно применять любые выпускаемые промышленностью измерительные резисторы типа Pt-100. Наиболее дешевые датчики типа Pt-100 выпускаются в тонкопленочном исполнении. Они



Гис. 2.1.4. Растроевые электронные микрофотографии тонкопленочных платиновых сопротивлений (фирма Degussa-Hanau),

Таблица 2.1.2.

Номинальные значения сопротивления платиновых измерительных резисторов на керамической основе (типа Pt-100) в диапазоне температур от 0 до +400 °С.

°C	0	1	2	3	4
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56
10	103,90	104,29	104,65	105,07	105,46
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08
50	119,40	119,78	120,16	120,55	120,93
60	123,24	123,62	124,01	124,39	124,77
70	127,07	127,45	127,84	128,22	128,60
80	130,89	131,27	131,66	132,04	132,42
90	134,70	135,08	135,46	135,84	136,22
100	138,50	138,88	139,26	139,64	140,02
110	142,29	142,66	143,04	143,42	143,80
120	146,06	146,44	146,81	147,19	147,57
130	149,82	150,20	150,57	150,95	151,33
140	153,58	153,95	154,32	154,70	155,07
150	157,31	157,69	158,06	158,43	158,81
160	161,04	161,42	161,79	162,16	162,53
170	164,76	165,13	165,50	165,87	166,24
180	168,46	168,83	169,20	169,57	169,94
190	172,16	172,53	172,90	173,26	173,63
200	175,84	176,21	176,57	176,94	177,31
210	179,51	179,88	180,24	180,61	180,97
220	183,17	183,63	183,90	184,26	184,63
230	186,82	187,18	187,54	187,91	188,27
240	190,45	190,81	191,18	191,54	191,90
250	194,07	194,44	194,80	195,16	195,52
260	197,69	198,05	198,41	198,77	199,13
270	201,29	201,65	202,01	202,36	202,72
280	204,88	205,23	205,59	205,95	206,31
290	208,45	208,81	209,17	209,52	209,88
300	212,02	212,37	212,73	213,09	213,44
310	215,57	215,93	216,28	216,64	216,99
320	219,12	219,47	219,82	220,18	220,53
330	222,65	223,00	223,35	223,70	224,06
340	226,17	226,52	226,87	227,22	227,57
350	229,67	230,02	230,37	230,72	231,07
360	233,17	233,52	233,87	234,22	234,56
370	236,65	237,00	237,35	237,70	238,04
380	240,13	240,47	240,82	241,17	241,51
390	243,59	243,93	244,28	244,62	244,97
400	247,04				

Продолжение табл. 2.1.2

°C	5	6	7	8	9
0	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
10	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
20	109,73	110,12	110,51	110,90	111,28
30	113,61	113,99	114,38	114,77	115,15
40	117,47	117,85	118,24	118,62	119,01
50	121,32	121,70	122,09	122,47	122,88
60	125,16	125,54	126,31	126,31	126,69
70	128,98	129,37	129,75	130,13	130,51
80	132,80	133,18	133,56	133,94	134,32
90	136,80	136,98	137,36	137,74	138,12
100	140,39	140,77	141,15	141,53	141,91
110	144,17	144,55	144,93	145,31	145,68
120	147,94	148,32	148,70	149,07	149,45
130	151,70	152,08	152,45	152,83	153,20
140	155,45	155,82	156,19	156,57	156,94
150	159,18	159,55	159,93	160,30	160,67
160	162,90	163,27	163,65	164,02	164,39
170	166,61	166,98	167,35	167,72	168,09
180	170,31	170,68	171,05	171,42	171,79
190	174,00	174,37	174,74	175,10	175,47
200	177,68	178,04	178,41	178,78	179,14
210	181,34	181,71	182,07	182,44	182,80
220	184,99	185,36	185,72	186,09	186,45
230	188,63	189,00	189,36	189,72	190,09
240	192,26	192,63	192,99	193,35	193,71
250	195,88	196,24	196,60	196,96	197,33
260	199,49	199,85	200,21	200,57	200,93
270	203,08	203,44	203,80	204,16	204,52
280	206,67	207,02	207,38	207,74	208,10
290	210,24	210,59	210,95	211,31	211,66
300	213,80	214,15	214,51	214,88	215,22
310	217,35	217,70	218,05	218,41	218,76
320	220,88	221,24	221,59	221,94	222,29
330	224,41	224,76	225,11	225,46	225,81
340	227,92	228,27	228,62	228,97	229,32
350	231,42	231,77	232,12	232,47	232,82
360	234,91	235,26	235,61	235,96	236,31
370	238,39	238,74	239,09	239,43	239,78
380	241,86	242,20	242,55	242,90	243,24
390	245,31	245,66	246,00	246,35	246,69

состоит из тонкой (0,6 мм) керамической подложки, на которую методом катодного ВЧ-распыления наносится слой платины толщиной около 2 мкм. В напыленном слое лазером выжигают орнамент в форме меандра и проводят тонкую доводку. Затем методом термокомпрессионной сварки изготавливают контактные выводы.

После этого для защиты активного платинового слоя от повреждений его еще раз покрывают керамическим изолирующим слоем толщиной 10 мкм. На рис. 2.1.4 показаны три датчика, изготавляемые таким способом фирмой Degussa-Hapau. Номинальные значения сопротивления измерительных резисторов типа Pt-100 при разных температурах приведены в табл. 2.1.2.

2.2. Термопары

Термопары представляют собой чувствительные элементы датчиков, пригодные для измерения в диапазоне температур от 0 до 2300 °C, причем, несмотря на высокую разрешающую способность и точность, цена их невысока. Термопары изготавливают путем соединения двух разнородных металлических проводов, например, меди и медно-никелевого сплава, железа и медно-никелевого сплава или платины и платинородиевого сплава. Две такие термопары образуют полный датчик. Если один спай погрузить, например, в тающий лед (0 °C), а второй ввести в контакт с объектом измерения, то между спаями возникает поддающаяся измерению термо-ЭДС, составляющая в зависимости от вида термопары 7...75 мкВ/°C (рис. 2.2.1).

В случае термопары из меди и медно-никелевого сплава термо-ЭДС в диапазоне температур 0...100 °C составляет примерно 40 мкВ/°C. При разности температур спаев в 100 °C получается примерно 4,3 мВ. Для достаточно точного измерения такого незначительного напряжения необходимы дорогие и сложные измерительные усилители. Кроме того, опорная температура всегда должна поддерживаться постоянной или тоже измеряться.

Компенсатор точки таяния льда для термопар

В последнее время получили распространение также интегральные схемы для измерения с помощью термопар без опорной точки при 0°C . Они содержат внутренний компенсатор точки таяния льда, поэтому достаточно одной термопары. На рис. 2.2.2 показан такой типовой блок (AD594, фирма Analog Devices)

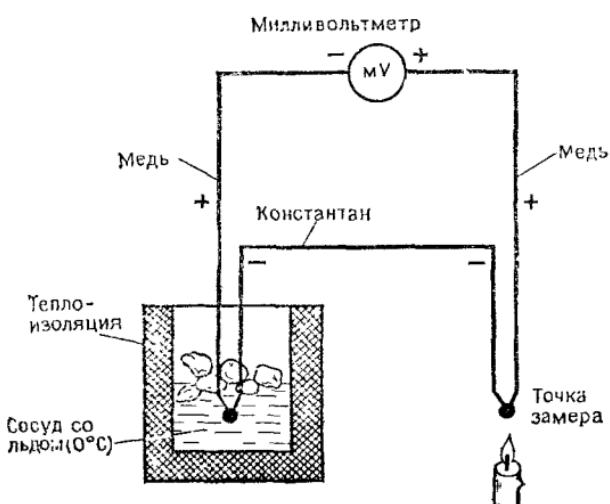


Рис. 2.2.1. Измерение температуры термопарой с использованием в качестве опорной точки температуры таяния льда (0°C).

для термопары константан — железо. Преобразователь сигнала термопары AD594 линеаризует термо-ЭДС датчика с коэффициентом $10 \text{ мВ/}^{\circ}\text{C}$ в интервале измерений $0\text{..}300^{\circ}\text{C}$. Если собственная температура блока AD594 изменится, то влияние этого изменения можно компенсировать только с помощью соответствующего поправочного коэффициента. Возможные ошибки, обусловленные изменением собственной температуры блока AD594 (дрейфовой погрешностью), показаны на рис. 2.2.3. Они могут достигать $0,6^{\circ}\text{C}$. Однако суммарная погрешность схемы может вызывать отклонение измеренной величины от номинального значения в несколько процентов. Таким образом, этот способ измерения температуры применим

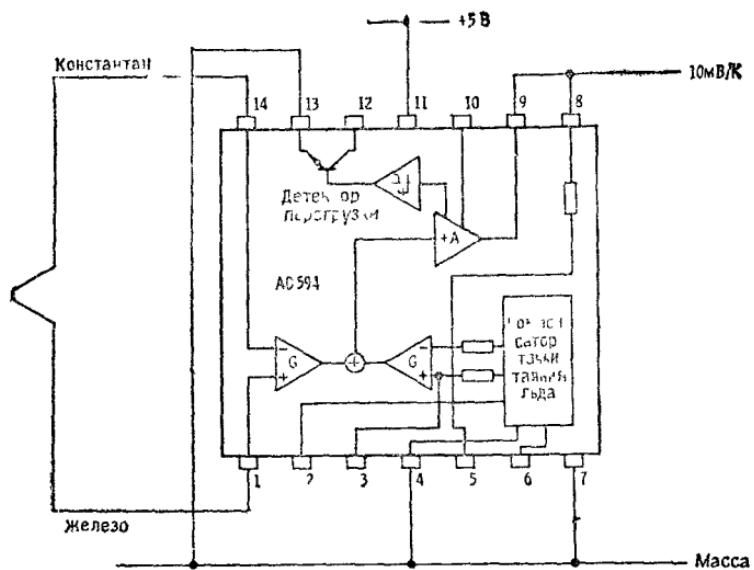


Рис. 2.2.2. Измерение температуры термопарой с использованием схемы с внутренним компенсатором точки таяния льда.

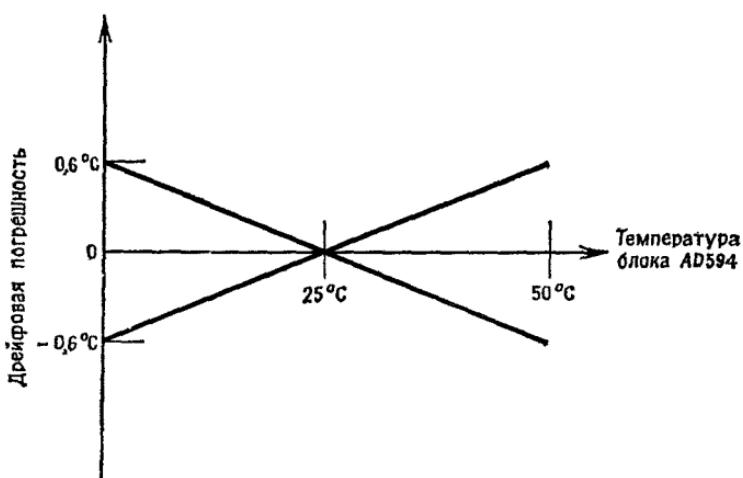


Рис. 2.2.3. Дрейфовая погрешность блока AD 594 в интервале температур от 0 до 50 °С.

лишь для простых схем регулирования. В случае высокоточных измерений потребуются, разумеется, значительно более высокие затраты.

2.3. Кремниевые датчики температуры

Измерение температуры с помощью кремниевых датчиков представляет особый интерес в случае массового применения, так как они значительно дешевле других датчиков и имеют большой температурный

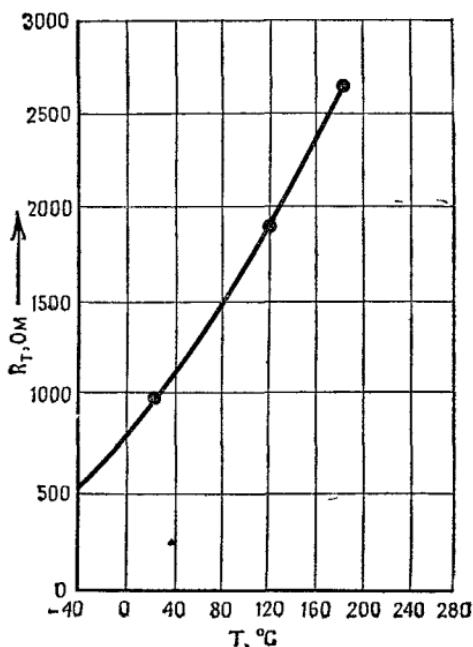


Рис. 2.3.1. Характеристика кремниевого датчика температуры.

коэффициент. Недостатками кремниевых датчиков являются меньший диапазон измеряемых температур и большая нелинейность. Однако для определенных применений эти недостатки имеют второстепенное значение.

На рис. 2.3.1 приведена характеристика кремниевого датчика температуры. Она довольно точно соот-

ветствует следующему квадратичному уравнению:

$$R_T = R_{25} [1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2],$$

где R_T — сопротивление при температуре T ($^{\circ}\text{C}$), R_{25} — сопротивление при эталонной температуре $T_b = 25^{\circ}\text{C}$,

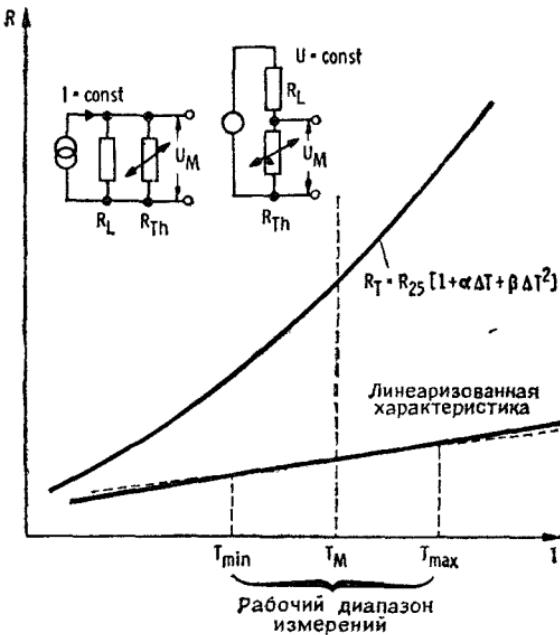


Рис. 2.3.2. Схема, линеаризующая характеристику кремниевого датчика температуры в диапазоне измерений ($T_{\min} < T < T_{\max}$),

ΔT — разность температур ($\Delta T = T - T_b$), α и β — температурные коэффициенты с типичными значениями $0,78 \cdot 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $1,84 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ соответственно.

Для более точных измерений с помощью кремниевого датчика температуры его квадратичная характеристика должна быть линеаризована. Проще всего это достигается включением не зависящего от температуры сопротивления R_L параллельно кремниевому датчику, если схема питается постоянным током. При питании постоянным напряжением R_L включается последовательно с датчиком R_{Th} (рис. 2.3.2). Измеряемое

28 Глава 2

напряжение U_M рассчитывается следующим образом:

$$U_M = I \cdot R_L \cdot \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_L} = I \cdot R_L \cdot m_T \text{ для } I = \text{const},$$

$$U_M = U \cdot \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_L} = U \cdot m_T \text{ для } U = \text{const}.$$

В результате преобразования уравнений получается выражение для линеаризирующего сопротивления R_L :

$$R_L = R_{25} \left[\left(\frac{\alpha^2}{\beta} - 1 \right) + 3 \Delta T_M (\alpha + \beta \Delta T_M) \right],$$

где

$$\Delta T_M = T_M - T_S \text{ и } T_S = 25^\circ\text{C}.$$

Сопротивление R_L зависит, таким образом, от выбора средней температуры T_M . Величина сопротивления R_L одинакова как при постоянном токе, так и при постоянном напряжении.

Пример

Датчик температуры типа КТУ 81 должен быть линеаризован для средней температуры 25°C .

При $R_{25} = 1 \text{ кОм}$, $\alpha = 0,78 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 1,84 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$, $\Delta T_M = 25^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 0$ получаем

$$R_L = 1 \text{ кОм} \left[\frac{(0,78 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})^2}{1,84 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}} - 1 \right] = 2,3 \text{ кОм}.$$

На рис. 2.3.3 изображена полная схема формирования измерительного сигнала для кремниевого датчика КТУ 81. Датчик размещен в плече измерительного моста, состоящего из резисторов $R_5 \dots R_9$. Резистор R_5 служит для линеаризации датчика R_6 . Измерительный мост питается напряжением 2,7 В, стабилизированным с помощью диода Зенера. Это напряжение выбрано таким малым, что измерительный ток не превышает 1 мА во избежание возникновения заметных погрешностей из-за самонагрева. Чувствительность измерительного моста составляет 4 мВ/°C

и повышается усилителем до 50 мВ/°С на выходе. В диапазоне измерений 0...100 °С в этом случае получается аналоговый сигнал от 0 до 5 В.

Приведенная на рис. 2.3.4 схема формирования сигнала дает на выходе импульс напряжения, длительность которого зависит от температуры. Диапазон измерений от -28 до +99 °С линеаризуется

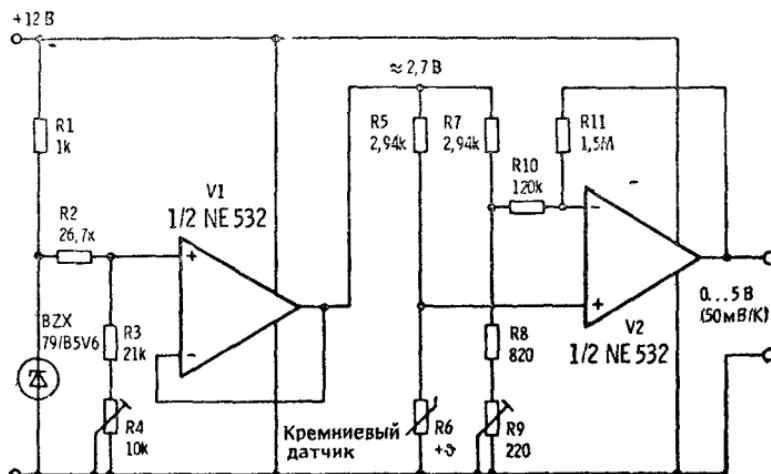


Рис. 2.3.3. Измерительная схема для кремниевого датчика температуры КТУ 81 (R_6).

с помощью двух резисторов R_1 и R_2 , включенных последовательно с кремниевым датчиком.

Интегральные датчики температуры

Представителем предварительно калиброванных интегральных датчиков температуры является кремниевый датчик типа STP 35 фирмы Texas Instruments. На рис. 2.3.5 показана схема внутренних соединений датчика, изготовленного на основе биполярной технологии. Вся схема этого монолитного интегрального датчика помещена в корпус TO-92. В данном случае в качестве измеряемой величины используется напряжение U_{BE} между базой и эмиттером кремниевого транзистора, которое при известной ширине запрещенной

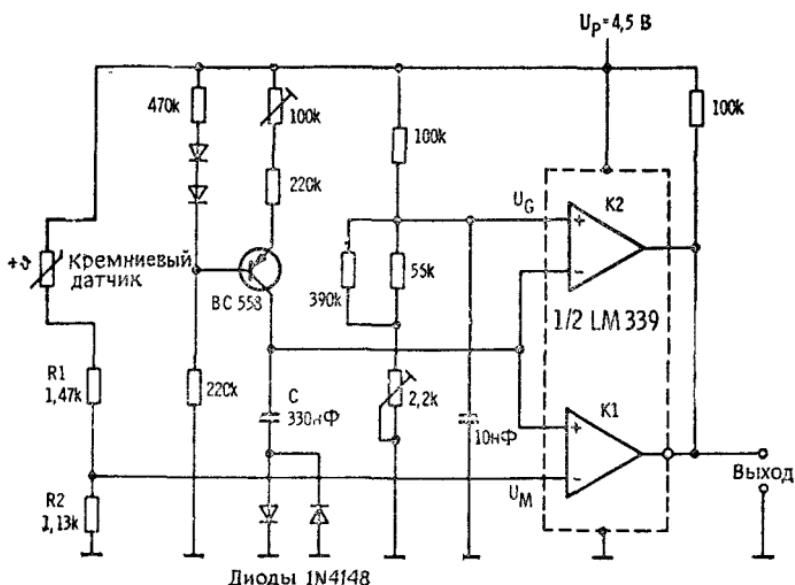


Рис. 2.3.4. Измерительная схема с импульсным выходным сигналом (цифровым), длительность которого зависит от температуры.

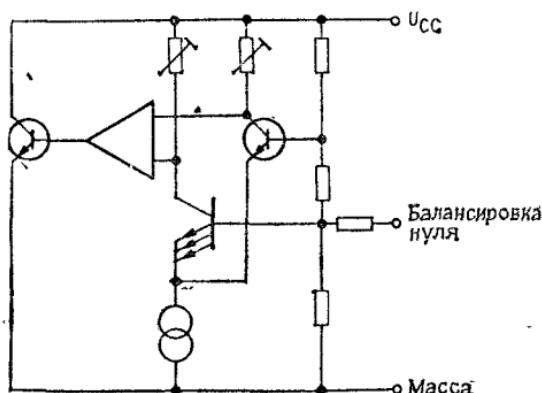


Рис. 2.3.5. Схема внутренних соединений кремниевого датчика температуры STP 35 фирмы Texas Instruments.

зоны описывается уравнением

$$U_{BE} = E + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_c}{T^n} \right),$$

где E — ширина запрещенной зоны, I_c — плотность тока, k — постоянная Больцмана, e — элементарный заряд ($1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл), n — коэффициент, характеризующий температурную зависимость диффузии носителей заряда.

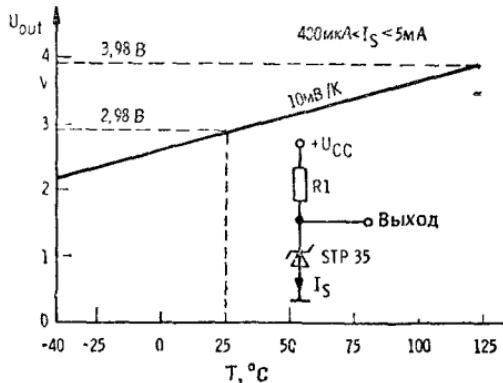


Рис. 2.3.6. Схема включения и характеристика интегрального датчика температуры STP 35: U_{out} — выходное напряжение.

Измерительные схемы с датчиками этого типа выполняются чрезвычайно просто (рис. 2.3.6). С помощью добавочного сопротивления R_1 устанавливается максимальный ток, меньший 5 мА, чтобы ограничить самонагрев датчика. Рабочее напряжение не нуждается в стабилизации и может находиться в диапазоне от 6 до 24 В. В этом случае чувствительность измеряемого на выходе напряжения составляет 10 мВ/°С. Усиленное в 100 раз выходное напряжение показывает абсолютную температуру по шкале Кельвина ($0^\circ\text{C} = 273$ К и $20^\circ\text{C} = 293$ К). Датчики могут быть изготовлены разных классов точности в зависимости от некомпенсированной погрешности в измерении температуры.

Оптимальный выбор (рис. 2.3.7) добавочного сопротивления R_A зависит от диапазона измерения температуры $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ и сопротивления нагрузки

(например, внутреннего сопротивления измерительного прибора). Сопротивление нагрузки может быть

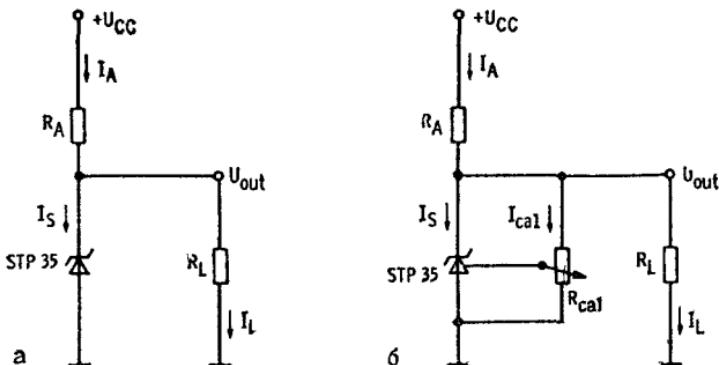


Рис. 2.3.7. Схемы согласования датчика температуры STP 35 с нагрузочным сопротивлением R_L : R_{cal} — калибровочное сопротивление; U_{out} — выходное напряжение.

расчитано следующим образом:

$$R_A = \frac{U_{cc_{min}} - U_{out_{max}}}{I_{S_{min}} + I_{L_{max}}},$$

где $U_{cc_{min}}$ — минимальное напряжение питания, $U_{out_{max}}$ — максимальное напряжение на выходе (равное $T_{max}(K)$: 100), $I_{S_{min}}$ — минимальный ток датчика (0,4 мА) и $I_{L_{max}}$ — максимальный ток нагрузки, равный $U_{out_{max}} : R_L$.

Пример

Для диапазона измерения температуры $\Delta T = 0\dots100^\circ\text{C}$, напряжения питания 8...14 В и внутреннего сопротивления используемого измерительного прибора $R_L = 10 \text{ к}\Omega$ получаются следующие значения:

$$I_{L_{min}} = \frac{2,73 \text{ В}}{10 \text{ к}\Omega} = 0,273 \text{ мА},$$

$$I_{L_{max}} = \frac{3,73 \text{ В}}{10 \text{ к}\Omega} = 0,373 \text{ мА},$$

$$U_{cc_{min}} = 8 \text{ В},$$

$$U_{out_{max}} = 3,73 \text{ В.}$$

На основании этого добавочное сопротивление R_A составит

$$R_A = \frac{8 \text{ В} - 3,73 \text{ В}}{0,4 \text{ мА} + 0,373 \text{ мА}} = 5,524 \text{ кОм} \approx 5,6 \text{ кОм}$$

(серия Е-12).

Максимальный ток датчика $I_{S\max}$ равен тогда

$$I_{S\max} = \frac{14 \text{ В} - 2,73 \text{ В}}{5,6 \text{ кОм}} = 2,01 \text{ мА.}$$

Максимально возможное изменение тока датчика от 0,4 мА до 2,01 мА вызывает погрешность, равную лишь 0,15 °С. Для более точных измерений потребуется стабилизация напряжения питания. В табл. 2.3.1

Таблица 2.3.1
Параметры датчиков типа STP 35 различных классов точности

	Погреш- ность при 25 °С, $\Delta T, ^\circ\text{C}$	Температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	Ток, мА	Чувстви- тель- ность, мВ/К	Время срабаты- вания на воз- духе, т. сек
STP 35A	± 3	-40 ... +125	0,4 ... 5	10	13
STP 35B	± 2	-40 ... +125	0,4 ... 5	10	13
STP 35C	± 1	-40 ... +125	0,4 ... 5	10	13

приведены параметры интегральных датчиков типа STP.

Температурный контроллер

Другим интересным примером является датчик температуры (табл. 2.3.2) LM3911 (температурный контроллер), выпускаемый фирмой National Semiconductor. Его способ действия аналогичен действию датчика STP 35 с напряжением на выходе, непосредственно указывающим абсолютную температуру по шкале Кельвина, деленную на 100 (т. е. на шкале прибора 3,93 В соответствуют 393 К). Датчик обладает чувствительностью 10 мВ/К. Схема внутренних соединений и расположение выводов на корпусе с

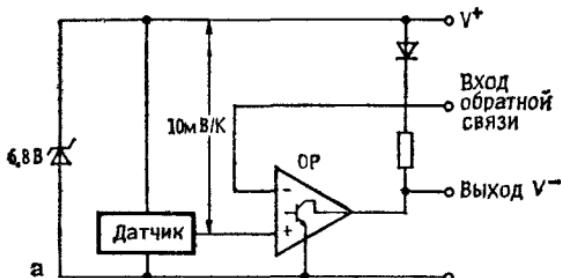
Таблица 2.3.2.

Типичные параметры датчика LM3911

Ток питания (максимальный)	10 мА
Напряжение обратной связи на входе	0 ... 7 В
Напряжение на выходе коллектора (макс.)	36 В
Рабочая температура	-25 ... +85 °С
Максимальная внешняя температура (при действии в течение 10 с)	300 °С
Выходное напряжение при -25 °С	2,36 ... 2,6 В
Выходное напряжение при +25 °С	2,88 ... 3,08 В
Выходное напряжение при +85 °С	3,46 ... 3,7 В
Линейность ($T = 100^{\circ}\text{C}$)	1 %
Длительная стабильность	0,3 %
Воспроизводимость	0,3 %

двуярдным размещением контактов показаны на рис. 2.3.8. Такой датчик можно применять в различных вариантах, два из которых описаны ниже.

LM3911



LM3911N

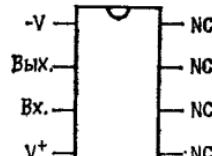


Рис. 2.3.8. Внутренние соединения температурного контроллера на основе интегральной схемы LM 3911 фирмы National Semiconductor: a — структурная схема; b — корпус датчика (вид сверху). NC — свободные выводы, ОР — операционный усилитель.

При подключении по варианту, показанному на рис. 2.3.9, можно, например, довольно просто использовать его как термометр с градуировкой по шкале Цельсия. Настроенным потенциометром сопротивлением 5 кОм выходное напряжение калибруется в градусах Цельсия. Чувствительность на выходе составляет также 10 мВ/°С.

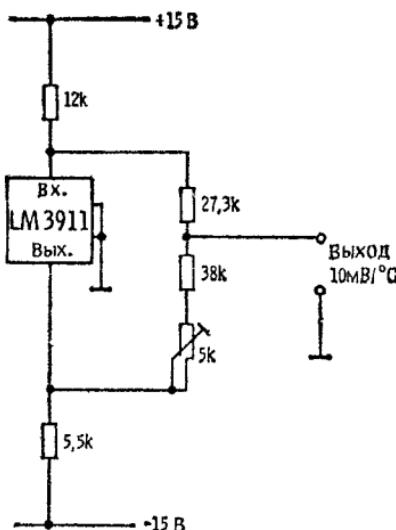


Рис. 2.3.9. Схема включения температурного контроллера LM 3911 с градуированным выходом 10 мВ/°C.

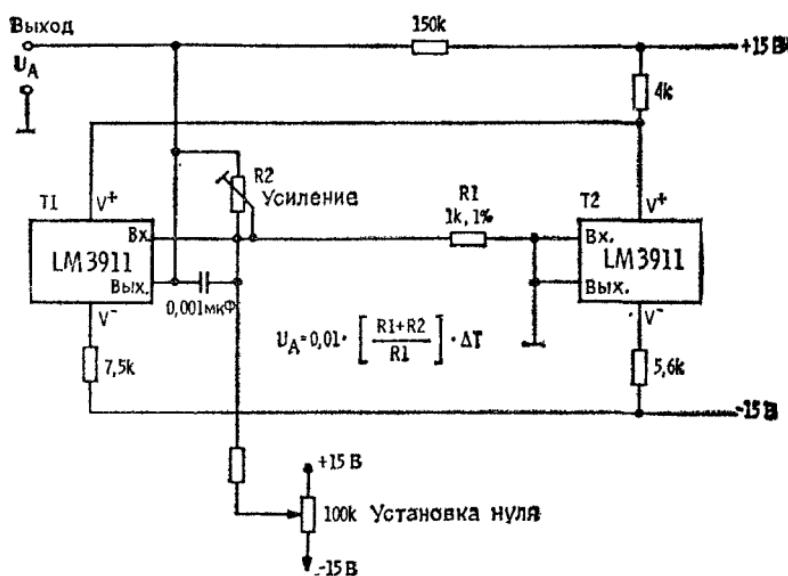


Рис. 2.3.10. Измерение разности температур двумя датчиками LM 3911.

Простой дифференциальный термометр на основе двух датчиков показан в качестве второго примера на рис. 2.3.10. С помощью этой схемы можно определять разность температур между точками T_1 и T_2 . При равенстве температур, т. е. при $T_1 = T_2$ настроенным потенциометром (100 кОм) выходное напряжение U_A устанавливается равным нулю. Калибровка чувствительности осуществляется путем изменения отношения $(R_1 + R_2)/R_1$ с помощью настроичного потенциометра R_2 .

Температурно-частотный преобразователь

Прямое преобразование аналоговой измеренной характеристики (температуры) в цифровой выходной

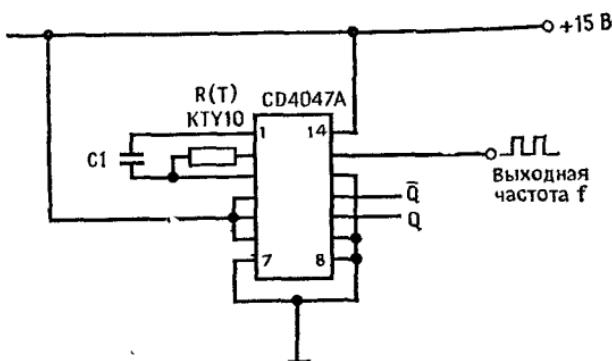


Рис. 2.3.11. Температурно-частотный преобразователь, состоящий из терморезистора (например, КТУ 10) и КМОП-мультивибратора (CD 4047A).

сигнал представляет особый интерес в связи с применением ЭВМ, поскольку отпадает, например, необходимость в дорогостоящих аналого-цифровых преобразователях. Кроме того, передача сигнала в цифровой форме надежнее, чем в аналоговой. На рис. 2.3.11 представлена простая схема температурно-частотного преобразователя. Датчик температуры $R(T)$ в сочетании с конденсатором C_1 образует RC -цепочку с зависящей от температуры постоянной времени для КМОП-мультивибратора CD4047A. Переменная вы-

ходная частота f на выводе 13 вычисляется по формуле

$$f = \frac{1}{2,2C_1R(\Gamma)}.$$

Зависимость выходной частоты f от температуры для различных датчиков иллюстрируется рис. 2.3.12.

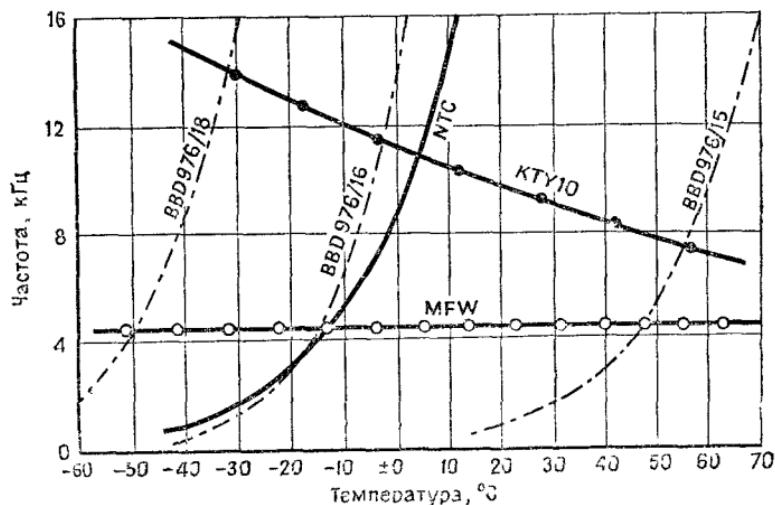


Рис. 2.3.12. Зависимость выходной частоты f от температуры для различных датчиков: NTC — терморезистор с отрицательным ТКС; MFW — металлопленочный резистор; BBD — диод с внутренним униполярным барьером.

Кремниевый датчик температуры КТУ 10 (фирма Siemens) имеет почти линейную характеристику в отличие от терморезисторов с отрицательным ТКС и диодов с внутренним униполярным барьером (BBD), включаемых встречно для компенсации температурной зависимости сопротивления.

2.4. Терморезисторы с отрицательным ТКС

Согласно стандарту ФРГ DIN 44070 и стандарту Международной электротехнической комиссии (IEC Publ. 539), терморезисторами с отрицательным ТКС называются полупроводниковые резисторы, сопротив-

ление которых падает при повышении температуры. У таких терморезисторов ТКС составляет около 3...6 %/К, что примерно в 10 раз больше, чем у платиновых или никелевых датчиков. Терморезисторы состоят из поликристаллической смеси различных спеченных оксидов, например Fe_2O_3 (шпинель), Zn_2TiO_4 , MgCr_2O_4 , TiO_2 или NiO и CoO с Li_2O . Процесс спекания осуществляется при 1000...1400 °C. Затем изготавливают контакты путем вжигания серебряной пасты. Для обеспечения высокой стабильности сопротивления, прежде всего при длительных измерениях, терморезисторы после спекания подвергают еще искусенному старению. С помощью специальных режимов обработки достигается высокая стабильность сопротивления.

Температурная характеристика терморезистора описывается следующим уравнением:

$$R_T = R_N \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right],$$

где R_T и R_N — соответственно сопротивление при температурах T и T_N (в градусах Кельвина), B — константа материала терморезистора, имеющая размерность К.

Тогда ТКС терморезистора оказывается равным

$$\alpha_R = -\frac{B}{T^2}$$

Температурная характеристика терморезистора при различных значениях B показана на рис. 2.4.1.

В продаже имеются терморезисторы в различных конструктивных исполнениях, в том числе и миниатюрные для обеспечения быстрого реагирования на изменение температуры. На рис. 2.4.2 показаны наиболее распространенные конструкции терморезисторов: дискообразные, стержневидные и миниатюрные.

Для применения в области автомобильной и бытовой электроники фирмой Siemens предлагается широкий набор специальных, не слишком дорогих терморезисторов.

Важным параметром терморезисторов является вольт-амперная характеристика (рис. 2.4.3). Она описывает связь между током через датчик и падением напряжения на нем. При токе около 1 мА вольт-амперная характеристика этих датчиков прямолинейна,

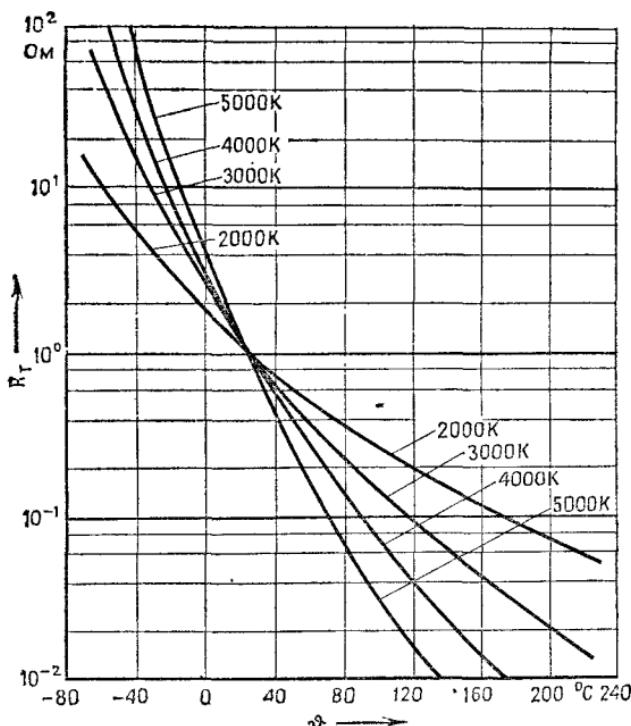


Рис. 2.4.1. Рабочие характеристики терморезисторов с отрицательным ТКС, отличающихся значением B .

так как еще не происходит изменения сопротивления из-за самонагрева. Если же ток через датчик увеличить, то его сопротивление изменится (станет меньше) и падение напряжения на нем уменьшится. В результате при определенном значении тока I характеристика имеет максимум, а при дальнейшем возрастании тока отклоняется вниз.

Отмеченные на характеристике точки отражают изменение температуры датчика из-за самонагрева.

Нагрев датчика, а вместе с тем и ход характеристики сильно зависят от рабочей среды. На рис. 2.4.4 показаны различные конструкции терморезисторов с отрицательным ТКС, используемых в качестве датчиков температуры:

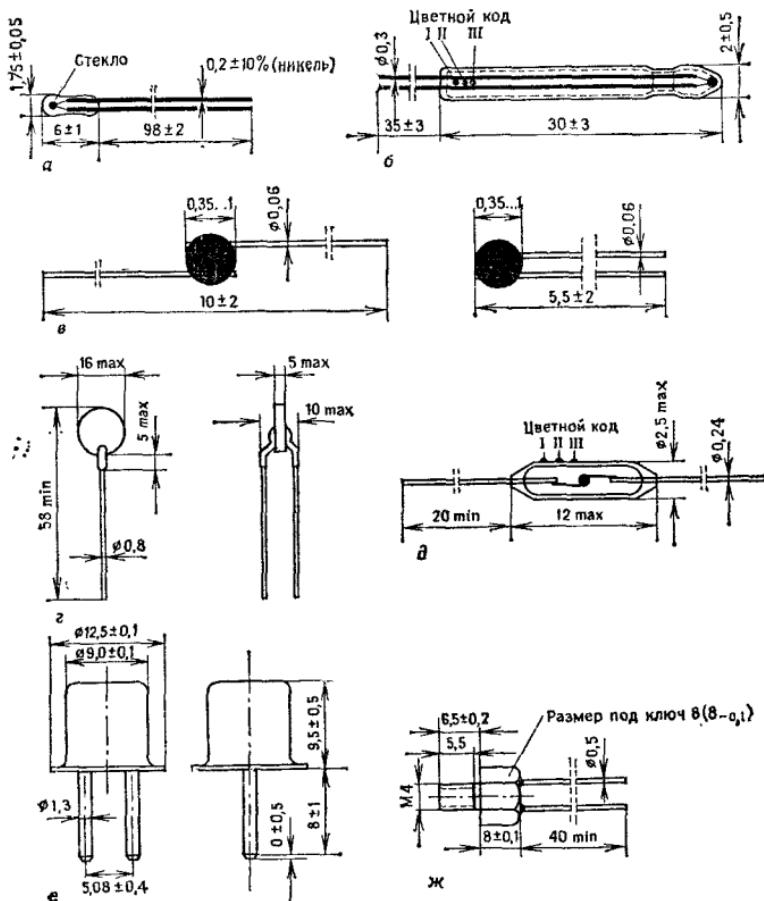


Рис. 2.4.2. Различные конструкции терморезисторов с отрицательным ТКС, используемых в качестве датчиков температуры: а, б, д — остеклованные, в — миниатюрные, г — дискообразные, е, жс — капсулированные.

зана вольт-амперная характеристика типичного терморезистора на воздухе и в воде. Поскольку в воде теплоотвод лучше, чем на воздухе, при размещении датчика в воде его характеристика проходит выше,

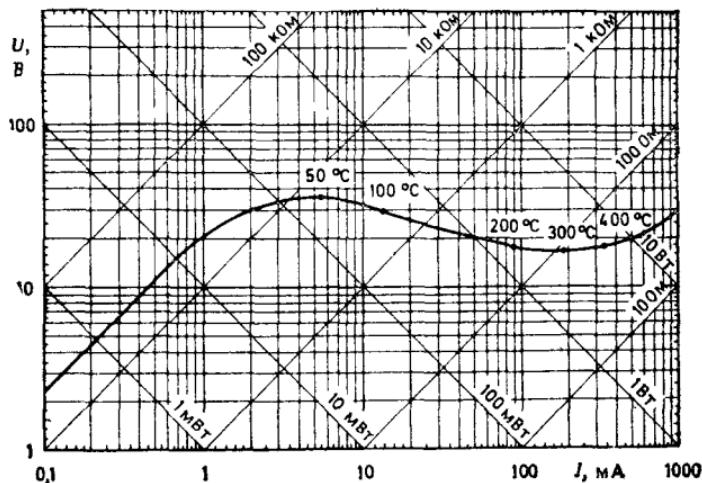


Рис. 2.4.3. Вольт-амперная характеристика терморезистора с отрицательным ТКС.

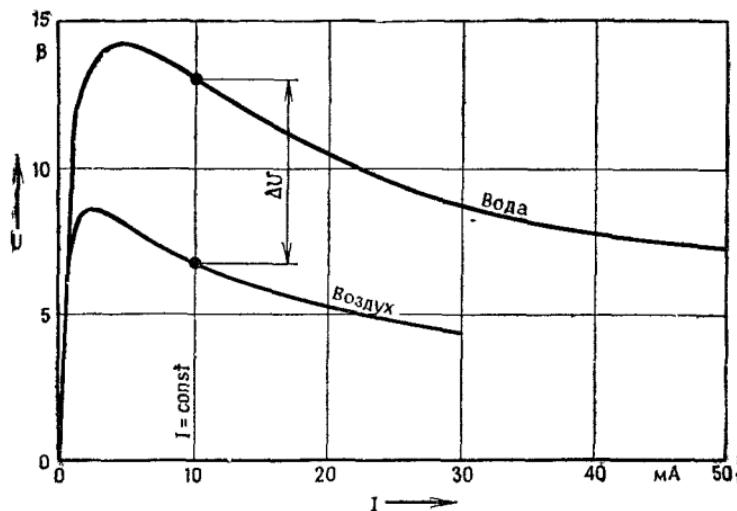


Рис. 2.4.4. Изображение в линейных координатах вольт-амперной характеристики датчика в различных средах.

чем на воздухе. Этот эффект можно использовать, например, для простого измерения уровня жидкости.

Если датчик работает на постоянном токе (около 10 мА), то падение напряжения на нем составляет около 6,8 В. Но в воде из-за более высокого сопротивления оно уже оказывается равным примерно

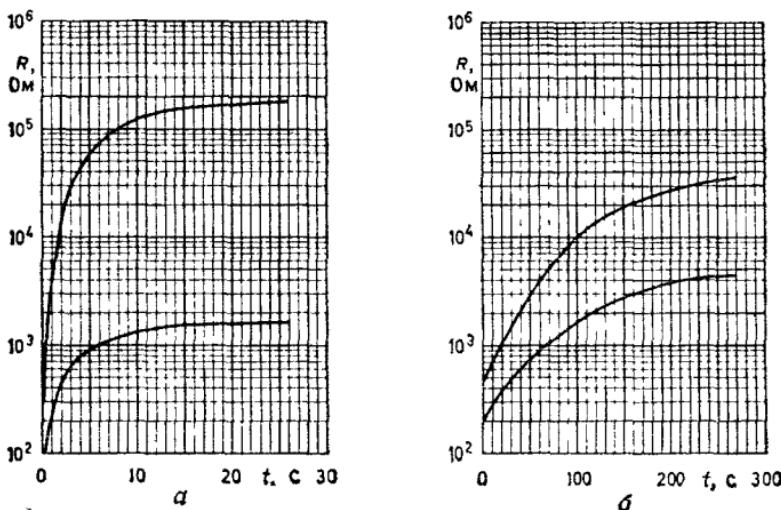


Рис. 2.4.5. Временная характеристика срабатывания миниатюрного (а) и дискообразного (б) терморезисторов с отрицательным ТКС.

13 В. Следовательно, как только датчик вступает в контакт с наполняющей средой (водой), напряжение скачком возрастает с 6,8 до 13 В. Этот скачок напряжения можно использовать для регулирования. Таким образом, на основе измерения температуры получается датчик уровня.

Быстрота электронной индикации этого скачка температуры (постоянная времени) зависит от геометрии датчика. На рис. 2.4.5 показана реакция на резкое изменение температуры миниатюрного датчика с малой массой и дискообразного терморезистора с отрицательным ТКС.

Если к терморезистору подключить еще резистор с не зависящим от температуры сопротивлением, то температурную характеристику терморезистора мож-

но изменить, как показано на рис. 2.4.6, *а* для последовательного (R_s) и параллельного (R_p) добавочных сопротивлений. Сочетание R_p и R_s дает возможность изменять ход характеристики температура — сопротивление, как показано на рис. 2.4.6, *б*.

Путем удачного подбора сопротивления R_p (па-

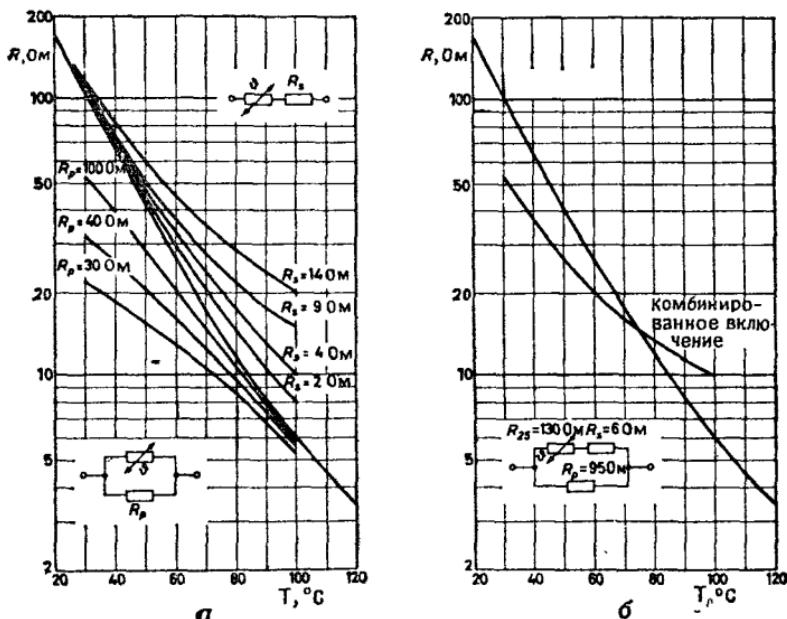


Рис. 2.4.6. Линеаризация характеристики терморезистора с отрицательным ТКС посредством параллельного и последовательного включения дополнительного термонезависимого сопротивления.

ралльное сопротивление) характеристику можно до некоторой степени линеаризовать (рис. 2.4.7), так как S-образная характеристика имеет некоторую точку перегиба (T_w). Наилучшая линеаризация достигается, когда эта точка перегиба находится в середине требуемого диапазона измерения температур. Сопротивление R_p линеаризующего резистора определяется по формуле

$$R_p = R_{T_M} \frac{B - T_M}{B + 2T_M},$$

где R_{T_M} — сопротивление терморезистора при температуре T_M ($T_M = T_W$), B — константа материала терморезистора.

Интересное применение такого линеаризованного терморезистора с отрицательным ТКС иллюстрируется рис. 2.4.8. Здесь R_t , R_1 и R_2 образуют термо-

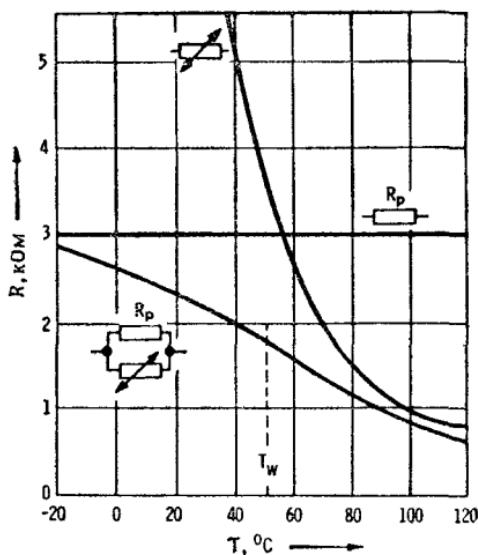


Рис. 2.4.7. Рабочие характеристики терморезистора с отрицательным ТКС и резистора с постоянным сопротивлением (R_p), а также характеристика их параллельного соединения.

зависимый делитель напряжения. Эта схема может быть использована, например, для температурной компенсации других выходных сигналов датчиков, подверженных сильному искажающему влиянию температуры. В точке перегиба S-образной кривой снова справедливо выражение

$$R = R_{T_M} \frac{B - 2T}{B + 2T},$$

где $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.

Отсюда можно получить зависящее от температуры изменение напряжения

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_0 \left(-\frac{B}{T^2} \right) \cdot \frac{R_{Th}}{R} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_T}{R} \right)^2}.$$

Соотношением плеч делителя напряжения $R_2/(R_1 + R_2)$ можно установить, следовательно, любую кру-

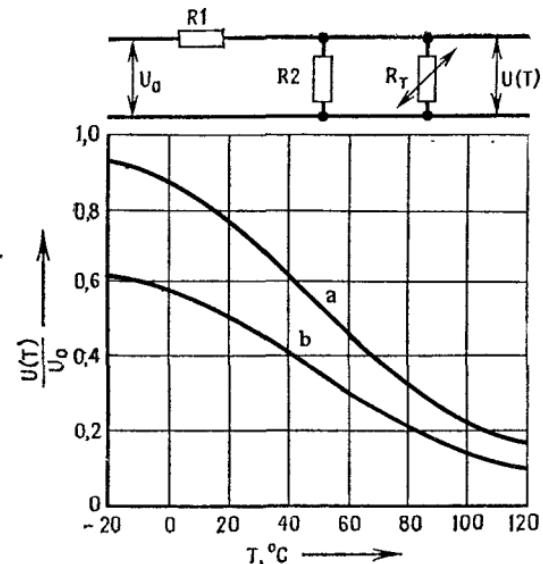


Рис. 2.4.8. Схема линеаризации, использующая термозависимый делитель напряжения для компенсации температурных погрешностей выходного сигнала датчика на терморезисторе с отрицательным ТКС.

тизу характеристики $U(T)/U_0$, т. е. зависимости изменения напряжения от изменения температуры.

Терморезисторы можно использовать также для задержки времени срабатывания реле (ри. 2.4.9). При подаче напряжения переключения U_B ток I протекает через реле и резистор R_T . Из-за высокого сопротивления терморезистора ток I меньше тока переключения I_s . В результате самонагрева терморезистора его

сопротивление снижается, ток возрастает до величины тока переключения I_s и контакт S_2 замыкается.

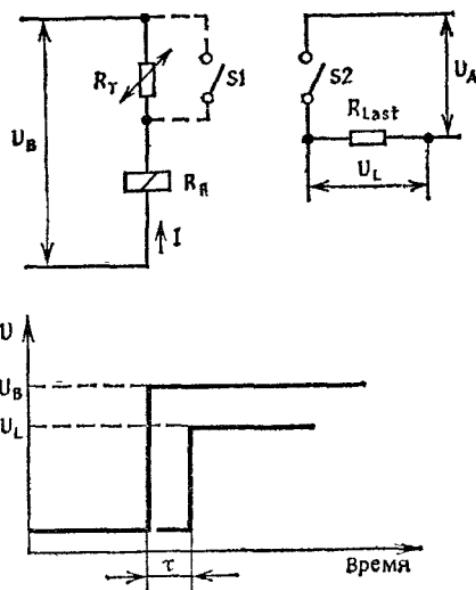


Рис. 2.4.9. Задержка включения реле (R_R) с помощью терморезистора с отрицательным ТКС (R_T). R_{Last} — нагрузочное сопротивление.

При этом время задержки τ определяется по формуле

$$\tau \sim \frac{1}{U_B^n},$$

где n принимает значения от 2 до 3.

2.5. Терморезисторы с положительным ТКС

Терморезисторами с положительным ТКС называют, согласно стандарту ФРГ DIN 44080, зависящие от температуры резисторы из легированной титанатной керамики. Эти резисторы во вполне определенных областях температур имеют очень высокий положительный ТКС (α_R), обусловленный взаимодей-

ствием полупроводниковых и сегнетоэлектрических свойств титанатной керамики. При изготовлении датчиков этого типа из смеси карбоната бария с оксидами стронция и титана путем прессования получают диски или стержни. Изменяя состав смеси, можно варьировать электрические свойства резистора,

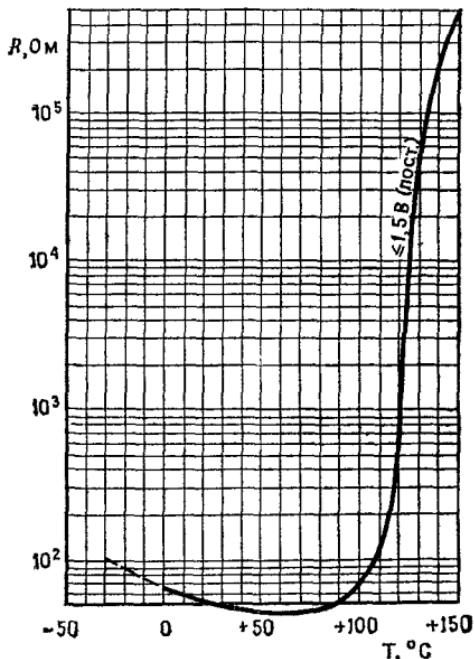


Рис. 2.5.1. Рабочая характеристика терморезистора с положительным ТКС.

Материал спекают путем отжига заготовки при температурах в диапазоне 1000...1400 °С. Затем изготавливают контакты.

На характеристике сопротивление — температура (рис. 2.5.1) ясно видно резкое возрастание сопротивления при температурах выше 110 °С. При этом кризисную можно разделить на отдельные участки в разных температурных диапазонах (рис. 2.5.2). Температура, при которой характеристика сопротивление — температура обладает явно выраженным положительным

ТКС, называется температурой реагирования T_N . Обычно за T_N принимают температуру, при которой сопротивление терморезистора в два раза превышает минимальное значение R_{\min} , т. е. $R_N = 2R_{\min}$. При

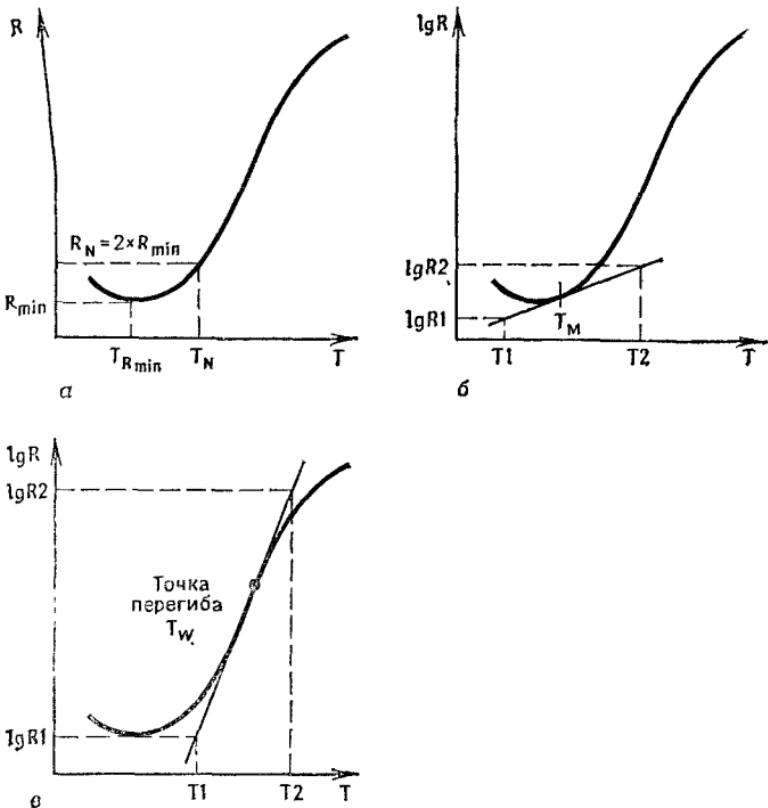


Рис. 2.5.2. Определение параметров датчика: *a* — температура реагирования T_N ; *b* — ТКС (α_R) при температуре T_M ; *в* — касательная в точке перегиба T_W .

некой температуре T_M температурный коэффициент такого терморезистора (α_R) описывается касательной к характеристике сопротивление — температура в точке, соответствующей этой температуре. При логарифмическом масштабе и $R_2 = 10R_1$ получаем

$$\alpha_R = \frac{100}{0,4343} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}, \%/\text{K}.$$

Максимальный ТКС, чаще всего приводимый в технических паспортах терморезисторов, соответствует наклону касательной в точке перегиба (рис. 2.5.2, б).

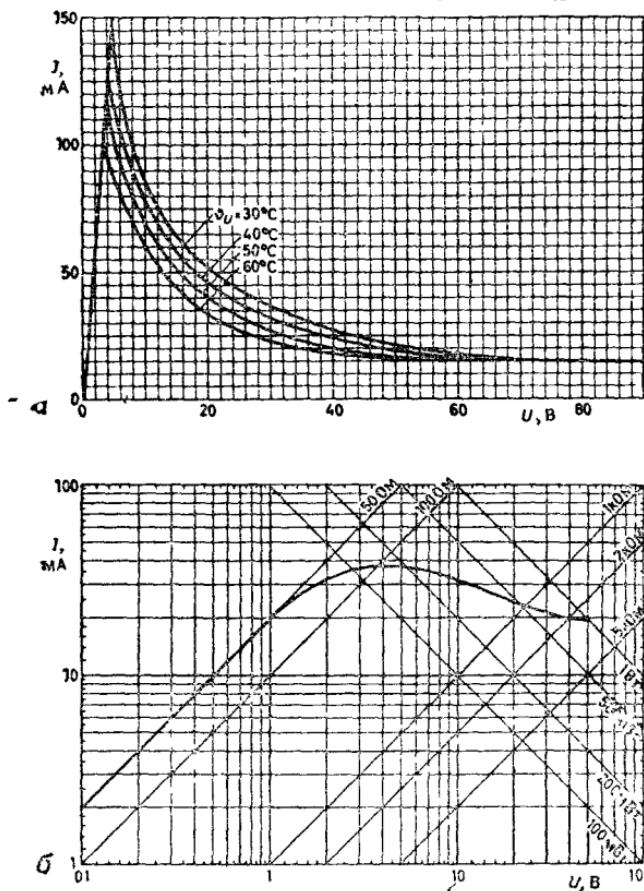


Рис. 2.5.3. Вольт-амперная характеристика терморезистора с положительным ТКС в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

Из статической вольт-амперной характеристики типичного терморезистора с положительным ТКС (рис. 2.5.3) отчетливо видно его ограничивающее ток действие. При малых напряжениях, согласно закону Ома, получается линейная зависимость между U и I ,

Однако, как только из-за большой потери мощности возникает самонагрев терморезистора, ток начинает быстро спадать и в итоге стабилизируется. Этот процесс зависит, естественно, от окружающей температуры и теплоотвода от терморезистора в рабочую среду.

Датчик уровня

На основании этого эффекта при использовании терморезистора с положительным ТКС (тип

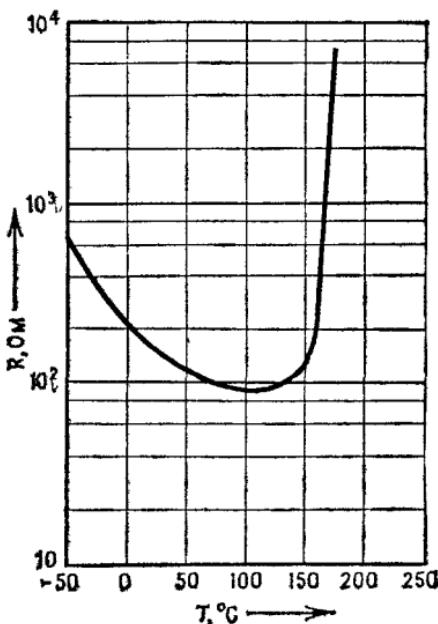


Рис. 2.5.4. Типичная рабочая характеристика терморезистора с положительным ТКС.

232267090023, фирма Valvo, табл. 2.5.1) можно изготовить датчик уровня жидкости (например, котельного топлива), более подробно описанный ниже.

Большой ТКС терморезистора в некотором узком температурном интервале (рис. 2.5.4) и отличие теплоотвода на воздухе и в топливе дает возможность изготовить датчик уровня. На рис. 2.5.5 проиллюстрирован наиболее неблагоприятный случай (теплое топ-

Таблица 2.5.1

Технические характеристики терморезистора с положительным ТКС типа 232267090023 фирмы Valvo

Сопротивление при температуре окружающей среды $\vartheta_u = +25^\circ\text{C}$ *	70 ... 250 Ом
Сопротивление при температуре окружающей среды $\vartheta_u = +200^\circ\text{C}$ и $U_{\text{измер}} = 18 \text{ В}$ (пульсирующее)	$\leq 1,8 \text{ кОм}$
Рабочий ток I (mA) при постоянном напряжении 12 В (-2%) 16 В (-2%) 18 В (-2%)	
Спокойный воздух -25°C (-1°C)	≤ 39
Топливо ** $+50^\circ\text{C}$ ($+1^\circ\text{C}$)	≥ 45
Вольт-амперная характеристика	
Максимальный ток I_{max} статической характеристики ***	80 mA
Рабочее напряжение при $\vartheta_u = 75^\circ\text{C}$ с последовательно включенным сопротивлением 100 Ом	19 В (постоянное)
Температура реагирования ϑ_N	$\approx 160^\circ\text{C}$
Температурный коэффициент α_R	$\approx 35 \text{ \%}/\text{K}$
Коэффициент теплопроводности G_{th} , мВт/К	
В спокойном воздухе при -25°C (-1°C)	≈ 2
В топливе при $+50^\circ\text{C}$ ($+1^\circ\text{C}$)	6,25
Рабочий диапазон температур ϑ_u , °C	
При нулевой нагрузке	$-55 \dots +125$
При U_{max} в спокойном воздухе	$-25 \dots +75$
При U_{max} в спокойном топливе	$-25 \dots +50$
Максимальная температура терморезистора с положительным ТКС, получающаяся в результате самонагрева ϑ_{PTC}	$+200^\circ\text{C}$
Масса	0,2 г

* Во избежание самонагрева измерительное напряжение не более 1,5 В (постоянное).

** Топливо марки SHELL S 5585.

*** Погрешности не превышают 480 мВт также и при напряжении 6 В, соответствующем I_{max} .

52 Глава 2

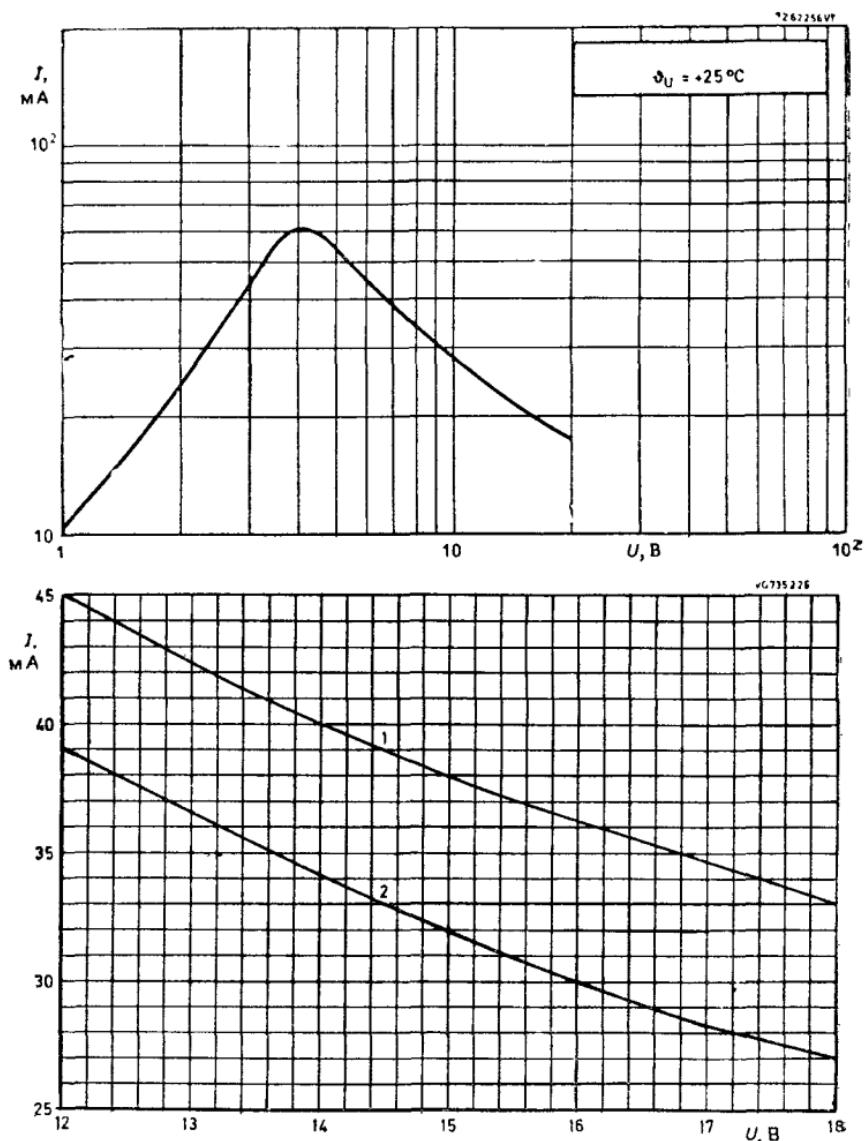


Рис. 2.5.5. Вольт-амперная характеристика терморезистора с положительным ТКС в различных средах (воздух — топливо). Вверху: в среде спокойного воздуха, $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$. Внизу: 1 — нижняя граница, спокойное топливо, $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$; 2 — верхняя граница, спокойный воздух, $\vartheta_U = -25^\circ\text{C}$.

ливо и холодный воздух). При этом разность токов минимальна, но все же достаточна, чтобы на нее реагировало соответствующее переключающее устройство. Если датчик питается, например, постоянным напряжением 15 В, то изменение тока оказывается не менее 6 мА. Для использования этого эффекта возможно следующее схемное решение (рис. 2.5.6).

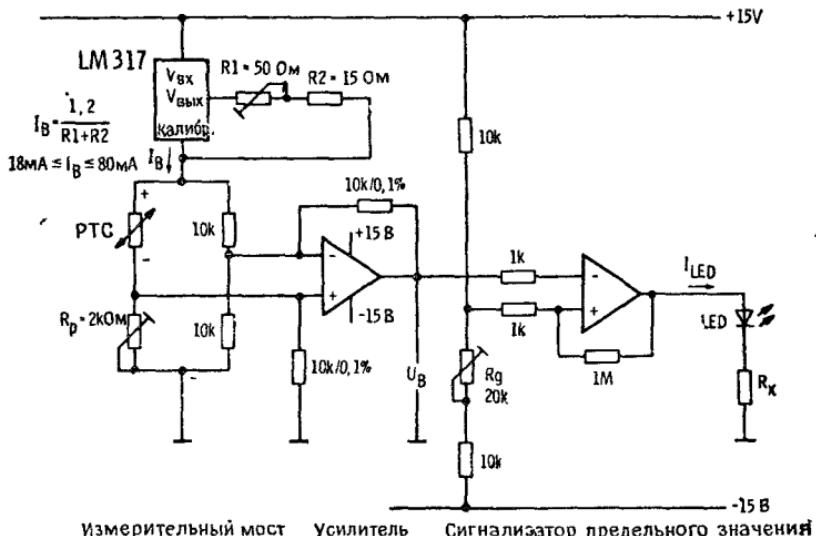


Рис. 2.5.6. Принципиальная схема измерения уровня датчиком температуры на основе терморезистора с положительным ТКС (PTC).

Терморезистор (R_T) с положительным ТКС включается в качестве активного элемента в измерительный мост, питающийся от источника постоянного тока (LM317). С помощью комбинации резисторов ($R_1 + R_2$) можно изменять ток I_B в интервале 20...80 мА. Резистором R_1 ток I_B устанавливается около 40 мА (на воздухе). Уравновешивание относительно нуля, когда $U_B = 0$ В, осуществляется настроенным потенциометром $R_p = 2$ кОм.

Если датчик погружается в контролируемую жидкость (например, в топливо), то напряжение U_B изменяется. С помощью регулируемого резистором R_g сигнализатора предельного значения это изменение

напряжения визуализируется светодиодом LED. Резистор R_x , сопротивление которого рассчитывается, ограничивает ток светодиода I_{LED} некоторым максимальным допустимым значением (в общем случае 10 мА). Вместо светодиода можно подключить реле.

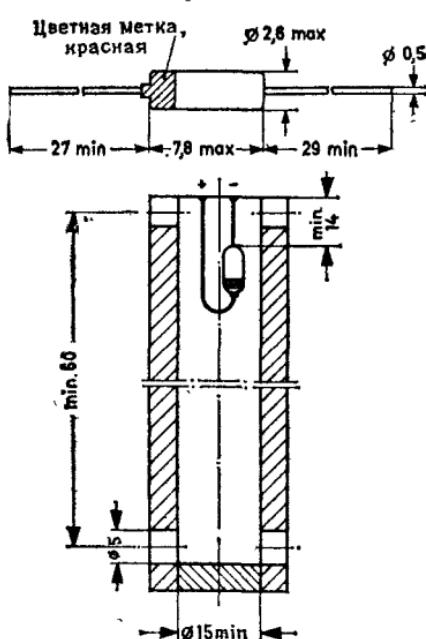


Рис. 2.5.7. Конструкция и размеры датчика уровня.

При встраивании терморезистора с положительным ТКС в головку датчика (рис. 2.5.7) важно соблюдать следующие меры:

1. Внутренний диаметр должен быть не меньше 15 мм.
2. Длина «холодного» вывода должна быть не меньше 14 мм (из них максимум 3 мм может быть использовано для спая с соединительным кабелем, так что должно оставаться по меньшей мере 11 мм свободной длины вывода).

3. Диаметр отверстий для впуска воздуха и топлива должен быть не меньше 5 мм; расстояние между отверстиями около 60 мм.

Поскольку теплопроводность в значительной мере ограничивается длиной вывода, изогнутый «горячий» вывод не должен быть слишком коротким. При монтаже терморезистора этот вывод должен быть направлен вниз (красная метка внизу).

Применение

На рис. 2.5.8 показаны некоторые распространенные виды датчиков на основе терморезисторов с положительным ТКС, пригодные для различных применений.

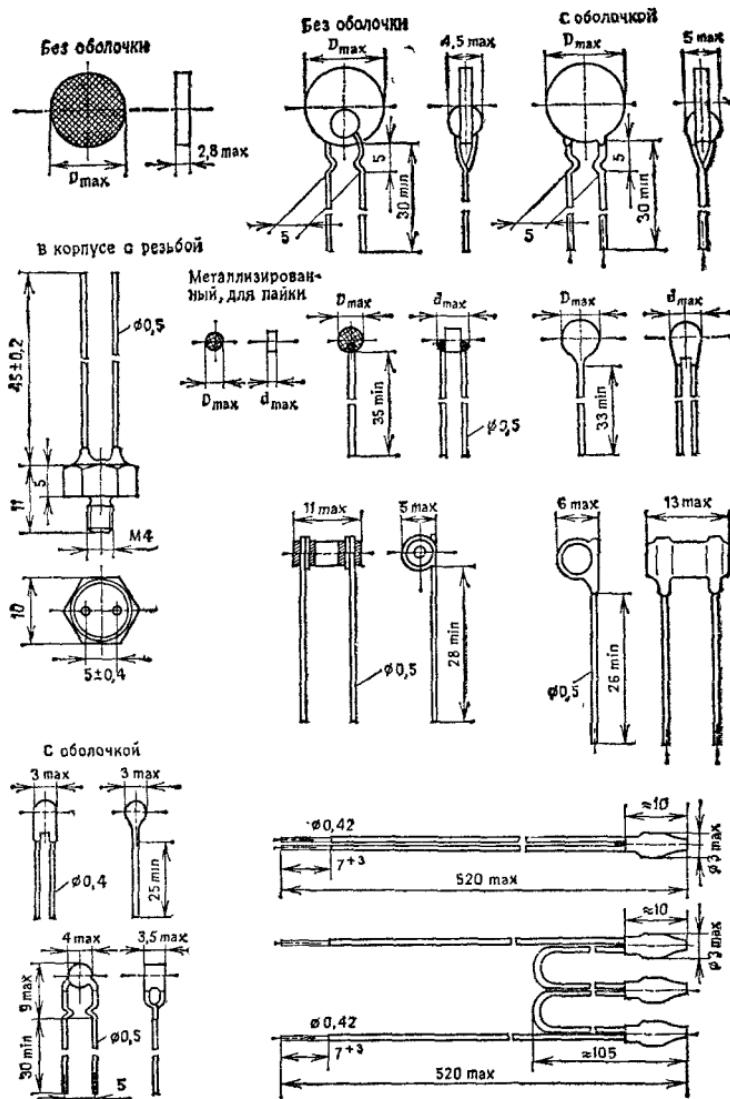


Рис. 2.5.8. Различные конструктивные формы датчиков температуры на основе терморезисторов с положительным ТКС (фирмы Siemens AG). Имеющиеся на датчиках маркировочные индексы соответствуют: *A* — для пайки, *S* — для клеммных контактов. Датчик в корпусе с резьбой электрически изолирован (испытательное напряжение переменное, $U_{is} = 220$ В и 3 кВ).

Лучше всего такие датчики зарекомендовали себя в качестве защиты электродвигателей от перегрузки или как защитные датчики механизмов. Если, например, терморезистор с положительным ТКС включен последовательно с потребителем тока (например, с электродвигателем), как показано на рис. 2.5.9, то

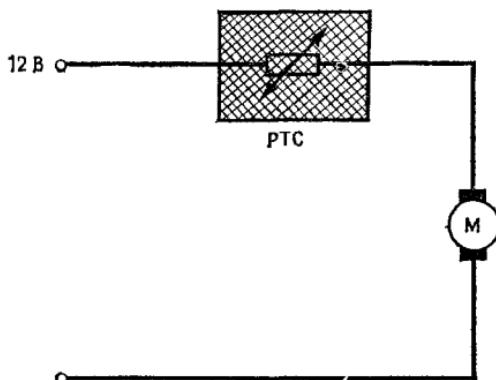


Рис. 2.5.9. Применение терморезистора с положительным ТКС в качестве защиты электродвигателя (*M*) от перегрузок.

при нормальном режиме работы через электродвигатель проходит оптимальный ток и сопротивление терморезистора в этом режиме незначительно. При возрастании тока в случае возникновения неисправности терморезистор быстро достигает своей расчетной температуры, т. е. становится высокоомным и снижает ток (ограничение тока).

Полупроводники можно применять также в качестве саморегулируемых нагревательных элементов и термостатов, так как они не требуют никаких дополнительных элементов. Если, например, к терморезистору с положительным ТКС приложить напряжение, вызывающее его нагрев до температуры выше расчетной, то происходит скачкообразное изменение температуры. В равновесном состоянии, т. е. когда подводимая электрическая энергия равна отводимой тепловой энергией, устанавливается постоянная температура, не зависящая от температуры окружающей среды.

Этот эффект может найти разнообразные применения, например:

- в технике связи (термостатирование кварцевых кристаллов, диодов и т. д.);
- в электронике (подогрев жидкокристаллических индикаторов и приборов, термостатирование небольшого количества жидкости в герметичной системе);

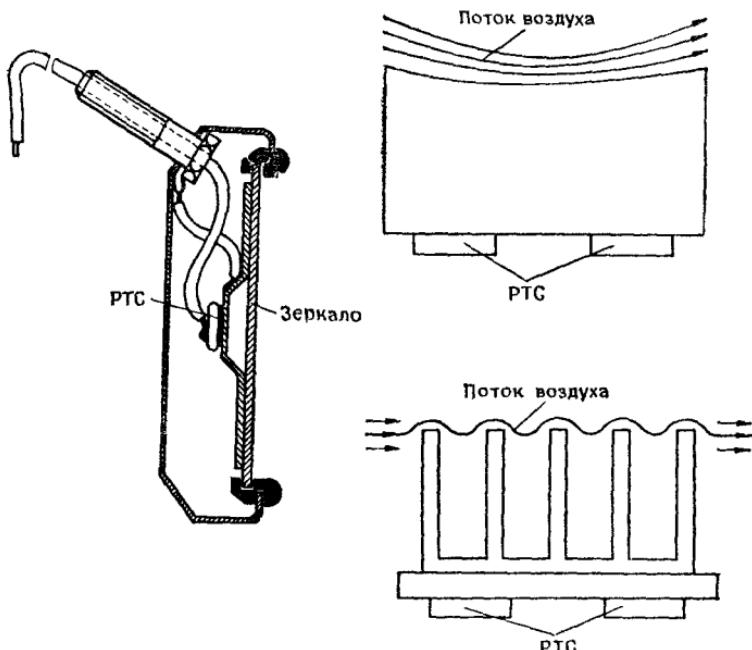


Рис. 2.5.10. Примеры применения саморегулируемых терморезисторов (PTC) для термостатирования в автомобиле. Стрелками показан поток воздуха к головке цилиндров.

ших участков, например интегральных схем, жидкокристаллических дисплеев, фильтров на волоконных световодах и т. д.);

- в медицине (испарители, ингаляторы, инструментальные шкафы, футляры или штативы для набора инструментов);

● в автомобильной технике (предварительный подогрев карбюратора, обогрев наружного зеркала,

нагрев жиклера, предварительный подогрев воздуха и т. д.);

- в бытовой технике (кефирницы, испарители, термостатированные подставки, подогреватели воды, размораживатели продуктов, подогреватели детского питания, нагреватели биметаллических выключателей, резаки для пористых пластиков типа «Стиропор», пистолет для горячей склейки, бигуди и т. д.).

На рис. 2.5.10 показаны два конкретных примера из автомобильной техники: обогрев наружного зеркала и предварительный подогрев воздуха.

При предварительном подогреве воздуха снижается расход топлива на прогрев двигателя и одновременно уменьшается выброс вредных веществ.

2.6. Измерение разности температур

Для определенных целей регулирования, например для регулирования нагревательной установки, важно измерять разность температур. Это измерение может быть осуществлено, в частности, по разности между наружной и внутренней температурой или температурой на входе и выходе.

Принцип измерения

Принципиальное устройство измерительной схемы показано на рис. 2.6.1. Схема состоит из двух мостов Уитстона, причем используется средняя ветвь (2) обоих мостов. Напряжение между точками 1 и 2 указывает разность температур между датчиками F_1 и F_2 , тогда как напряжение между точками 2 и 3 соответствует температуре датчика F_2 , а между точками 3 и 1 — температуре датчика F_1 .

Одновременное измерение температуры T_1 или T_2 и разности температур $T_1 - T_2$ важно при определении термического КПД тепловой машины (процесс Карно). Как известно, коэффициент полезного действия W получается из уравнения

$$W = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}.$$

Таким образом, для определения КПД машины нужно только найти отношение двух напряжений

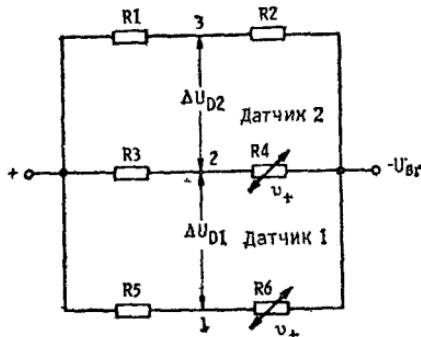


Рис. 2.6.1. Измерительный мост для определения абсолютных значений температуры и разности температур в двух точках. U_{Br} — напряжение моста.

ΔU_{D2} и ΔU_{D1} (рис. 2.6.1) между точками 1 и 2 и точками 2 и 3.

2.7. Калибровка

Для точной настройки описанных приборов, предназначенных для измерения температуры, нужны довольно дорогие калибровочные устройства. Для области температур 0...100 °С в распоряжении пользователя имеются вполне доступные опорные температуры, так как 0 °С или 100 °С по определению являются соответственно точками кристаллизации или кипения чистой воды.

Калибровка по 0 °С (273,15 К) осуществляется в воде с тающим льдом. Для этого изолированный сосуд (например, термос) заполняют сильно измельченными кусками льда и заливают водой. Через несколько минут в этой ванне устанавливается температура, точно равная 0 °С. Погрузив датчик температуры в эту ванну (Внимание! Убедитесь в исправности изоляции соединительных проводов!), получают показания датчика, соответствующие 0 °С.

Аналогично действуют и при калибровке по 100 °С (373,15 К). Металлический сосуд (например, ка-

стрюлю) наполовину заполняют водой. Сосуд, разумеется, не должен иметь никаких отложений (накипи) на внутренних стенках. Нагревая сосуд на плитке, доводят воду до кипения и тем самым достигают 100-градусной отметки, которая служит второй калибровочной точкой для электронного термометра.

Линейность

Для проверки линейности калиброванного таким образом датчика необходима по меньшей мере еще

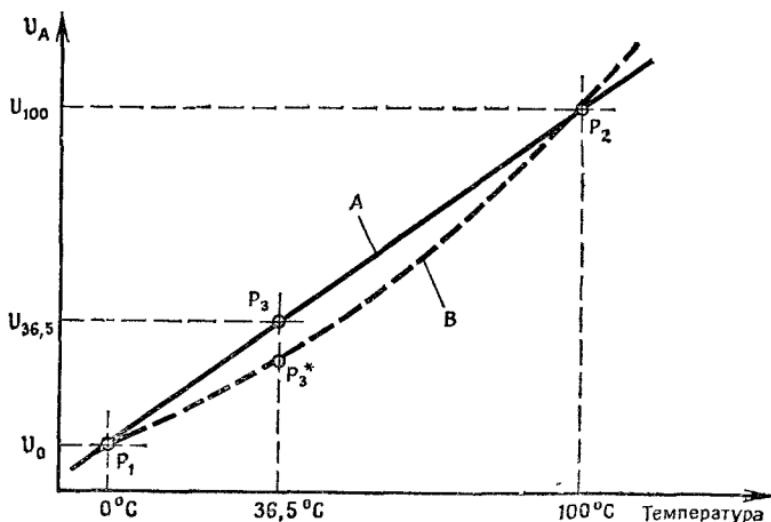


Рис. 2.7.1. Определение линейности характеристики датчика в диапазоне 0...100°C. Линейная (A) и нелинейная (B) характеристики датчиков совпадают в опорных точках 0 и 100°C.

одна контрольная точка, которая должна быть расположена как можно ближе к середине измеряемого диапазона (около 50°C).

Для этого нагретую воду снова охлаждают до указанной области и ее температуру точно определяют с помощью калиброванного ртутного термометра, имеющего точность отсчета 0,1°C. В области температур около 40°C для этой цели удобно применять медицинский градусник. Путем точного измерения температуры воды и выходного напряжения получают

третью опорную точку, которая может рассматриваться как мера линейности датчика.

Два различных датчика, откалиброванные вышеописанным методом, дают совпадающие показания в точках P_1 и P_2 , несмотря на их различные характеристики (рис. 2.7.1). Но дополнительное измерение, например температуры тела, выявляет нелинейность характеристики B датчика 2 в точке P_3^* . Линейная характеристика A датчика 1 в точке P_3 соответствует точно 36,5 % полного напряжения в измеряемом диапазоне, тогда как нелинейная характеристика B соответствует явно меньшему напряжению.

ГЛАВА 3

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Как и датчики температуры, датчики давления относятся к наиболее широко употребительным в технике. Однако для непрофессионалов измерение давления представляет меньший интерес, так как существующие датчики давления относительно дороги и имеют лишь ограниченное применение. Несмотря на это, рассмотрим некоторые варианты их использования.

3.1. Кремниевые датчики

Для любительской практики представляют интерес лишь относительно недорогие кремниевые датчики давления, имеющие выходной сигнал чаще всего порядка нескольких вольт. Обычно такой датчик изготавливают из кремниевой пластины, часть которой вытравливают до образования тонкой мембранны. Методом ионной имплантации на мембране выполняют резистивные элементы с межсоединениями. При изменении давления мембрана прогибается, и под действием пьезоэлектрического эффекта происходит изменение сопротивления резистивных элементов. Толщина мембранны, как и геометрическая форма резисторов, определяется областью допустимых давлений. Преимуществами широко распространенных датчиков этого типа являются:

- высокая чувствительность,
- хорошая линейность,
- незначительные гистерезисные явления,
- малое время срабатывания,
- компактная конструкция,

• экономичная планарная технология изгото-
ления.

Недостаток, заключающийся в повышенной тем-
пературной чувствительности, можно в большинстве
случаев скомпенсировать.

Область применения датчиков давления опреде-
ляется возможным диапазоном измеряемых давлений
(см. табл. 3.1.1).

Таблица 3.1.1

Области применения датчиков давления

Уровень давления	Применение
40 мбар	Измерение уровня жидкости в стиральных и посудо- моечных машинах
100 мбар	Пылесосы, контроль фильтров, измерение расхода
200 мбар	Измерение кровяного давления
1 бар	Барометр, регулировка зажигания и впрыска в ав- томобильных двигателях
2 бар	Измерение разрежения на такте всасывания в авто- мобильных двигателях
10 бар	Измерение давление масла и сжатого воздуха в тор- мозной системе автомобиля; холодильники
50 бар	Пневматические системы, промышленные роботы
500 бар	Гидравлические системы, строительные машины

Четыре однотипных пьезорезистора образуют мост, как показано на рис. 3.1.1. При этом отдельные ре-
зисторы ($R_1 \dots R_4$) соединены так, что при прогибе
мембранны сопротивление резисторов R_1 и R_3 возрас-
тает, а у R_2 и R_4 — уменьшается. В результате дости-
гается высокая чувствительность измерительного мо-
ста. Выходное напряжение U_A соответствует тогда
уравнению

$$U_A = U_{cc} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)}.$$

На рис. 3.1.2 графически представлена зависи-
мость $U_A(p)$ для типичного кремниевого датчика дав-
ления. Здесь же продемонстрировано и влияние тем-
пературы на чувствительность.

Поскольку в этом случае максимальное выходное напряжение составляет лишь 0,1 В, для дальнейшей обработки сигнала его нужно усилить еще примерно до 1 В. Такое 10-кратное усиление по напряжению с помощью стандартных операционных усилителей (741, LM358 и т. п.) не составляет проблем, а

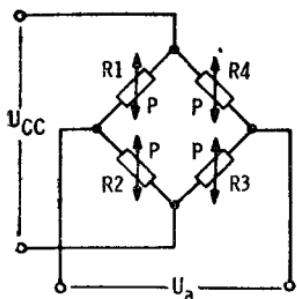


Рис. 3.1.1. Измерительный мост из четырех идентичных пьезорезисторов, составляющих в совокупности датчик давления.

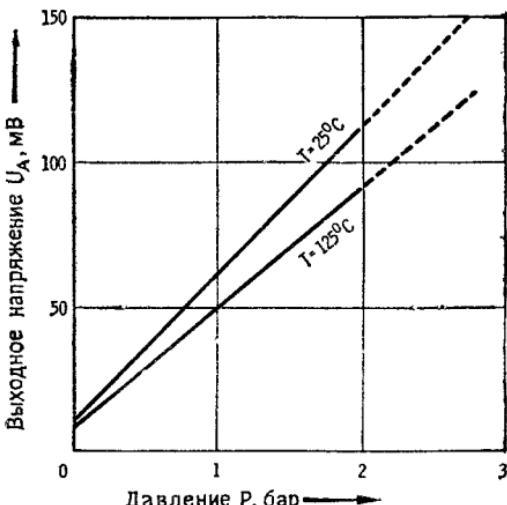


Рис. 3.1.2. Характеристика кремниевого датчика давления при различных температурах (25 и 125 °C).

поэтому согласование сигнала с измерительным прибором осуществляется легко. Для измерений с повышенной точностью следует дополнитель но компенсировать температурную погрешность датчиков.

Компенсация температурной погрешности

В принципе следует различать температурный коэффициент смещения нуля и температурный коэффициент чувствительности и каждую отдельную погрешность компенсировать индивидуально.

Температурный коэффициент смещения нуля (примерно $-2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$) представляет собой температур-

шую погрешность сигнала в нулевой точке шкалы. Он примерно в 10 раз меньше температурного коэффициента чувствительности (около $-2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$). Простейший способ температурной компенсации состоит

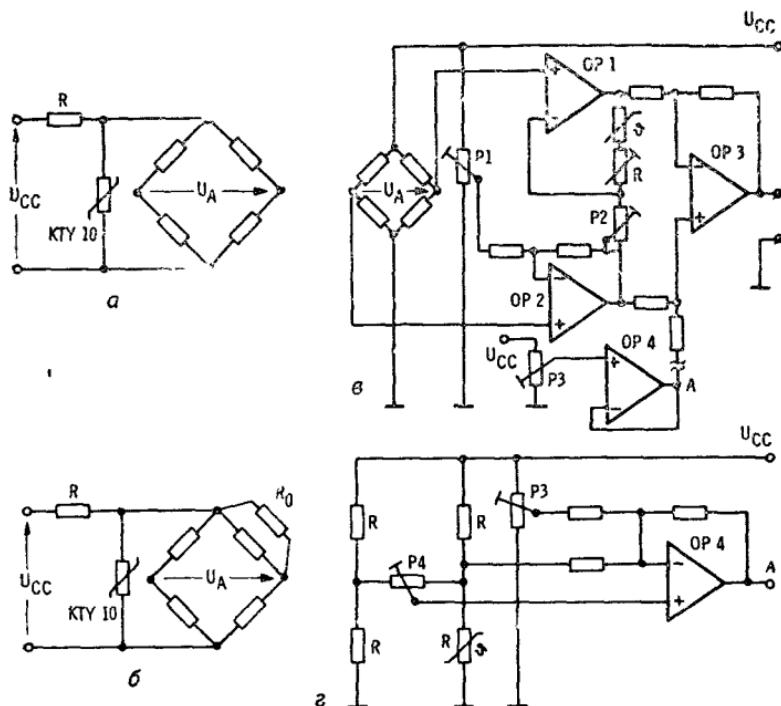


Рис. 3.1.3. Схемы компенсации для кремниевого датчика давления: *а* — пассивная компенсация чувствительности моста; *б* — установка нуля шкалы и пассивная компенсация температурного смещения нуля с помощью дополнительного резистора R_0 ; *в* — активная компенсация чувствительности моста и смещения нуля шкалы; *г* — дополнительная возможность активной компенсации температурного смещения нуля шкалы (к схеме *а*). *OP* — операционный усилитель.

в так называемой пассивной компенсации с помощью резисторов и датчиков температуры, как показано на рис. 3.1.3, *а* и *б*. Правильным подбором шунтирующих резисторов (R/R_0), а также датчика температуры (например, типа КТУ 10) можно оказывать влияние как на смещение нуля, так и на изменение

чувствительности. Однако лучше осуществлять активную компенсацию с помощью операционных усилителей (см. рис. 3.1.3, в и г), которая почти полностью устраниет температурную погрешность. На рис. 3.1.3, в показана полная схема кремниевого датчика давления с активной компенсацией изменения чувствитель-

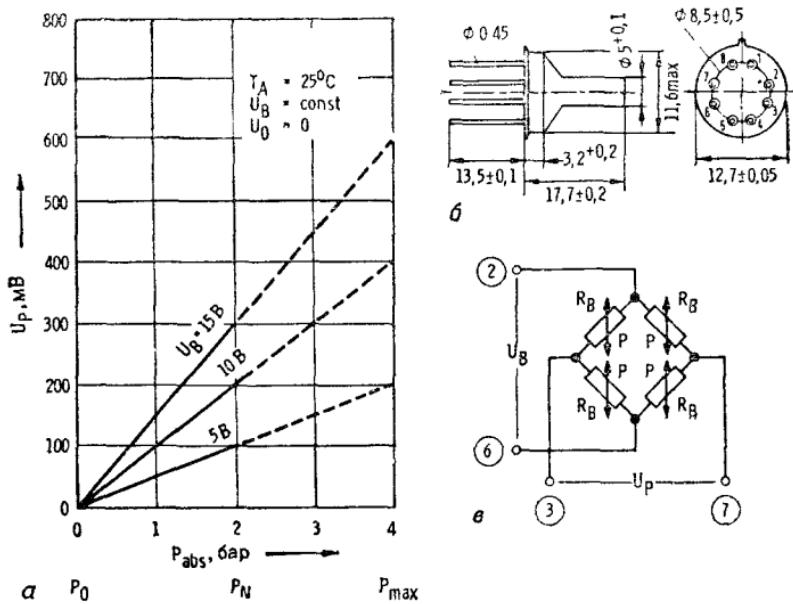


Рис. 3.1.4. Датчик давления типа КРУ (фирмы Siemens AG):
а — типичная зависимость выходного напряжения U_p от абсолютного давления P_{abs} при рабочей температуре $T_A = 25^\circ\text{C}$, рабочем напряжении $U_B = \text{const}$ и напряжении в нулевой точке $U_0 = 0$; б — механическое устройство; в — электронная схема.

ности и смещения нуля. Два операционных усилителя $OP1$ и $OP2$ включены как неинвертирующие усилители, причем коэффициент усиления $OP1$ управляется датчиком температуры КТУ 10. Поскольку с повышением температуры чувствительность датчика давления падает, при соответствующем подборе параметров КТУ 10 и R коэффициент усиления $OP1$ может быть увеличен настолько, что потеря чувствительности окажется скомпенсированной. С помощью усили-

теля $OP4$ нулевую точку можно установить произвольно. Если схема в точке A заменена схемой по рис. 3.1.3, г, то смещение пуля регулируется независимо от компенсации чувствительности. При этом резистор $R(\vartheta)$ включен как активный элемент в измерительном мосте, выходное напряжение которого согласовывается с усилителем $OP4$.

Некоторые конструкции датчиков давления

На рис. 3.1.4 показан датчик давления из серии KPY (фирмы Siemens) для недорогих устройств. Технические характеристики датчиков этой серии приведены в табл. 3.1.2.

Таблица 31.2.

Некоторые характеристики датчиков давления типа КРУ

Тип датчика	Максим. давление P_{\max} , бар	Рабочий диапазон давлений P , бар	Сопротивление моста R_B , кОм	Максим. входное напряжение U_{in} , В	Температурный диапазон применения, °C
KPY 10 *	4	0 ... 2	7	16	-40 ... +125
KPY 14 *	20	0 ... 10	7	16	-40 ... +125
KPY 12 **	4	0 ... 2	7	16	-40 ... +125
KPY 16 **	20	0 ... 10	7	16	-40 ... +125

* Абсолютные избыточные.

** Относительные избыточные.

Датчик давления КР 100А (фирмы Valvo) имеет уже виагрекцию температурную компенсацию (активную), которая уменьшает температурную погрешность чувствительности в 10 раз. Малые габариты (рис. 3.1.5) позволяют встраивать датчик в приборы и аппараты, где другие датчики давления не умещаются. Параметры датчиков этого типа частично представлены в табл. 3.1.3 и графически на рис. 3.1.6.

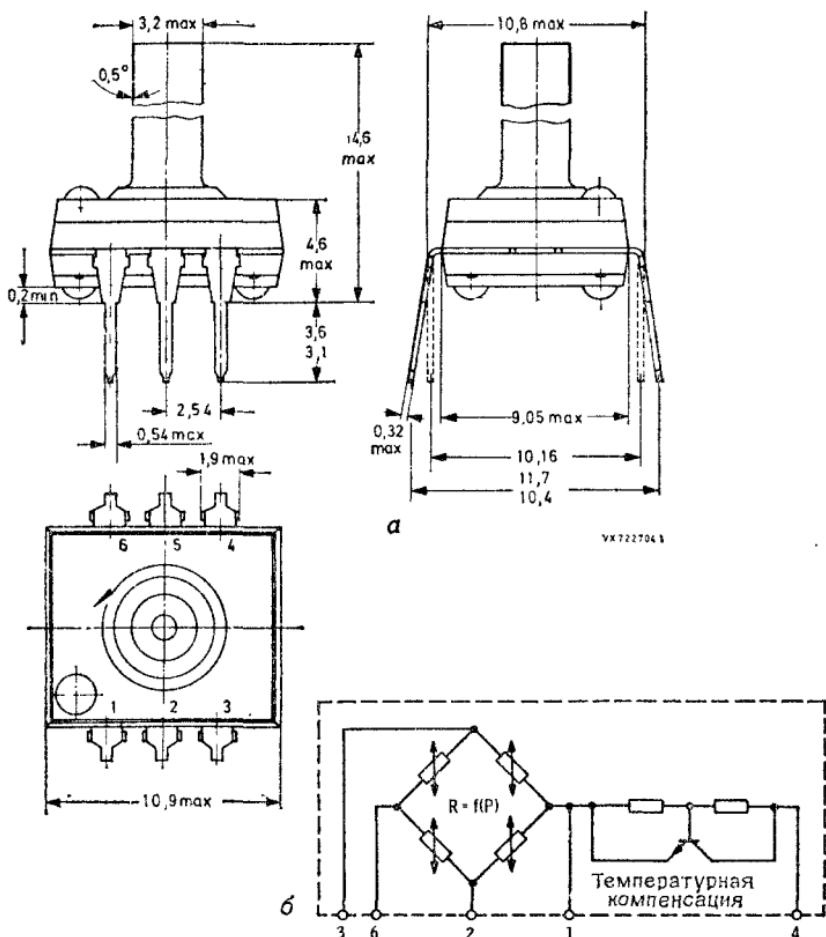


Рис. 3.1.5. Механическое устройство (а) и электронная схема (б) датчика давления КР 100А (фирмы Valvo) с внутренней компенсацией температуры. Цоколевка выводов: 1 — входное напряжение моста, $+U_B$; 2 — выходное напряжение моста, $+U_P$; 3 — выходное напряжение моста, $-U_P$; 4 — температурная компенсация, $+U_{BK}$; 5 — внутреннее соединение; 6 — входное напряжение моста, $-U_B$.

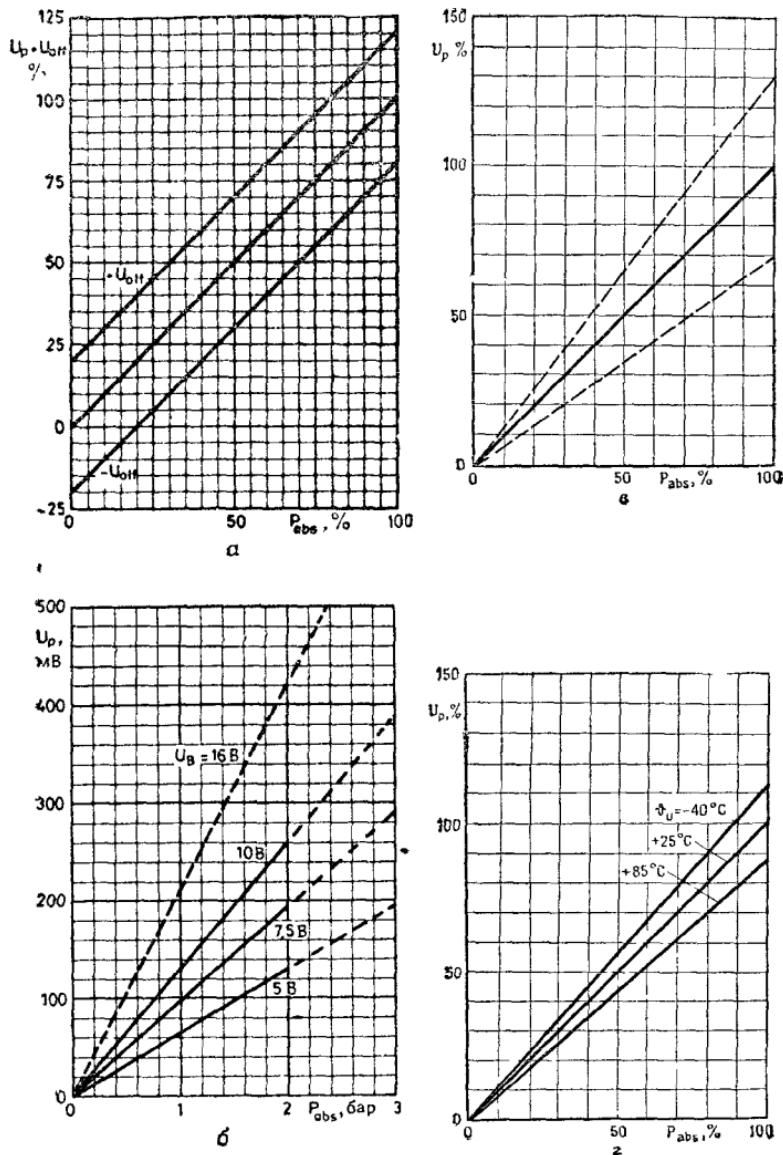


Рис. 3.1.6. Характеристики датчика давления КР 100А при различных условиях эксплуатации: а — область допустимых значений смещения нулевой точки ($\pm U_{off}$), $U_B = \text{const}$, $\vartheta_u = \text{const}$; б — зависимость выходного напряжения U_p от рабочего напряжения U_B (измерено без температурной компенсации), $U_{off} = 0$, $\vartheta_u = 25^\circ\text{C}$; в — область допустимых значений чувствительности, $U_B = \text{const}$, $U_{off} = 0$, $\vartheta_u = \text{const}$; сплошная линия — средние значения, пунктирующая линия — границы поля разброса; г — зависимость выходного напряжения U_p от рабочей температуры ϑ_u (измерено без температурной компенсации), $U_B = \text{const}$, $U_{off} = 0$.

Таблица 313.

Характеристики датчика КР 100 А фирмы Valvo

Рабочие характеристики

Рабочее напряжение	$U_B(1/6)$, В	7,5
Рабочий диапазон давлений	P , бар	0 ... 2
Чувствительность при температуре 25 °C	s , мВ/(В · бар)	13
Температурный коэффициент чувствительности с температурной компенсацией в диапазоне температур -40 ... +85 °C	α_{skomp} , %/К	$\leq \pm 0,02$
Температурный коэффициент чувствительности в диапазоне температур -40 ... +85 °C	α_s , %/К	$\leq -0,22$
Сопротивление моста при 25 °C	R_{Br} , Ом	1800 ($\pm 15\%$)
Смещение напряжения нулевой точки при температуре 25 °C	U_{off} , мВ/В	± 5
Температурный коэффициент смещения напряжения нулевой точки в диапазоне температур -40 ... +85 °C в процентах от полной шкалы на 1 K	α_{off}	$\leq \pm 0,04$
Нелинейность в диапазоне давлений 0 ... 2 бар	%	$\leq 0,7$

Пределные характеристики

Рабочее напряжение (кратковременно)	$U_B(1/6)$, В	≤ 16
Допустимое давление	P , бар	≤ 4
Продавливающее давление	P , бар	≥ 7
Рабочая температура	ϑ_U , °C	$-40 \leq \vartheta_U \leq +103$

Внимание!

Температура припоя не должна превышать 260 °C в течение 10 с.

На рис. 3.1.7 показана мембрана датчика давления, на верхней стороне которой отчетливо видны активные резистивные элементы.

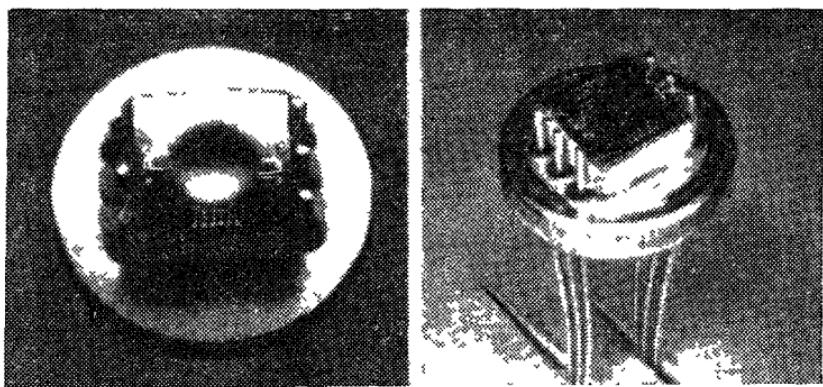


Рис. 3.1.7. Мембрана датчика давления с тонкопленочными резисторами.

3.2. Электронный барометр

Существуют некоторые интересные варианты применения датчиков давления, уже упомянутые в табл. 3.1.1. К их числу относится измерение атмосферного давления или высоты.

Описанный ниже барометрический прибор пригоден для точного измерения давления атмосферного воздуха, которое на уровне моря равно 1013 мбар. С увеличением высоты (например, в горах) или при переменном состоянии погоды давление воздуха сильно изменяется. На высоте 10 км, например, оно падает до 264 мбар, а на 20 км — до 55 мбар. Изменение давления воздуха в зависимости от высоты (относительно уровня моря) описывается так называемым барометрическим уравнением высоты:

$$P_L = P_0 \exp(-h/H) \quad \text{или} \quad h = H \ln\left(\frac{P_0}{P_L}\right),$$

где P_L — давление воздуха на высоте h , P_0 — давление воздуха на уровне моря (1013 мбар), H — кон-

станта. Зависимость давления воздуха от высоты иллюстрируется данными табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1.

Зависимость давления воздуха от высоты

Высота, <i>h</i> , м	Давление, <i>P_L</i>		Высота, <i>h</i> , м	Давление, <i>P_L</i>	
	мм рт. ст.	мбар		мм рт. ст.	мбар
0	760	1 013	800	691	921
100	751	1 001	900	683	910
200	742	989	1 000	675	899
300	733	977	2 000	596	795
400	724	966	3 000	526	701
500	716	955	5 000	405	540
600	707	943	10 000	198	264
700	699	932	20 000	41	55

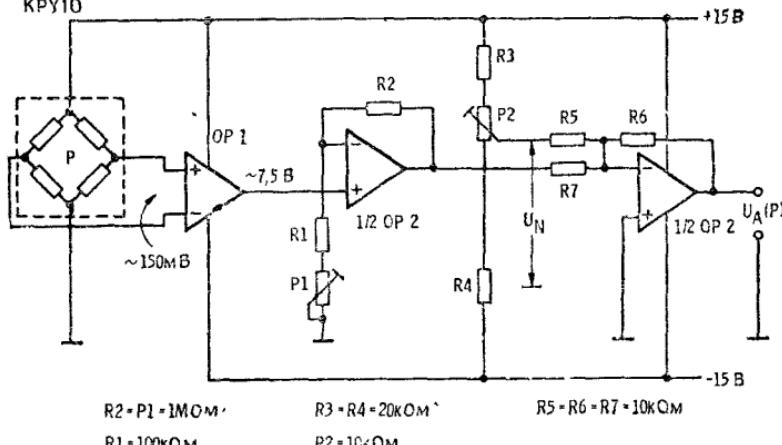
При подъеме от 0 до 500 м давление воздуха снижается примерно на 58 мбар. В среднем получается 0,12 мбар/м. В зависимости от погодных условий давление воздуха колеблется в диапазоне от ≈ 980 мбар (низкое) до ≈ 1025 мбар (высокое), т. е. по перепаду давления это соответствует перепаду высоты около 500 м.

Принципиальная схема барометра

Принципиальная схема электронного барометра изображена на рис. 3.2.1. Датчик давления (например, KPY 10 фирмы Siemens) питается стабилизированным напряжением 15 В. Выходное напряжение составляет при этом 0...300 мВ для диапазона давлений 0...2 бар. Диапазон измерения давления атмосферного воздуха составляет 50 мбар (± 25 мбар), следовательно, выходное напряжение должно быть усилено в 50 раз. Для этого можно применить дифференциальный усилитель (например, LM363). При нормальном атмосферном давлении на вход усилителя подается напряжение $\Delta U = 150$ мВ, которое повышается операционным усилителем *OPI* до $\approx 7,5$ В. Вторым операционным усилителем (например, LM358)

с помощью настроичного потенциометра P_1 напряжение сигнала доводится до 10 В. Сопротивления R_2 и P_1 равны 1 МОм, а сопротивление R_1 равно 100 кОм.

Датчик давления
КРУ10



Гис. 3.2.1. Электронная схема барометра с датчиком давления КРУ 10. Напряжение питания 15 В, стабилизированное. OP — операционный усилитель.

Установка нуля осуществляется делителем напряжения $R_3 = R_4 = 20$ кОм и $P_2 = 10$ кОм.

Калибровка

Точная установка (калибровка) выходного сигнала U_A осуществляется на испытательном стенде, показанном на рис. 3.2.2.

С помощью U-образной манометрической трубы, заполненной водой, можно создать колебания давления ± 25 мбар, необходимые для регулировки чувствительности датчика давления. Поскольку нормальное давление 1013 мбар соответствует водяному столбу 10,34 м, колебание давления ± 25 мбар соответствует изменению водяного столба $\pm 25,5$ см. U-образный манометр состоит из двух стеклянных трубок длиной около 1 м, соединенных между собой резиновым шлангом и наполовину заполненных водой (при возможности — дистиллированной). Если давление

на входе и выходе одинаково, то и уровень воды в обеих трубках будет на одинаковой высоте. В этом состоянии выход манометра соединяют с датчиком давления другим резиновым шлангом и отмечают выходное напряжение U_{A1} . Нагнетая воздух во вход манометра, смещают уровень воды на 25,5 см. Это второе выходное напряжение U_{A2} также отмечают. Раз-

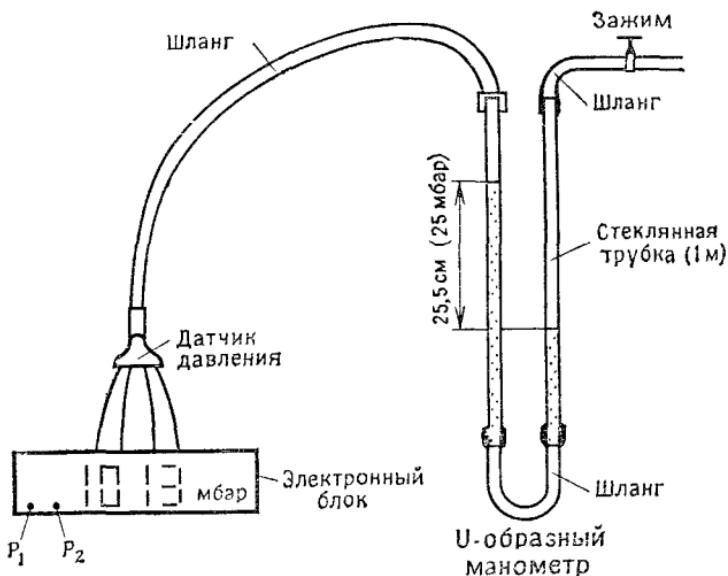


Рис. 3.2.2. Устройство для калибровки датчиков давления.

ность $\Delta U_A = U_{A2} - U_{A1}$ после калибровки должна составлять 250 мВ. Если величина ΔU_A слишком мала, то нужно увеличить усиление с помощью настроечного потенциометра P_1 . Указанная процедура повторяется до тех пор, пока не получится $\Delta U_A = 250$ мВ.

Затем устанавливают нулевую точку. Для этого у местной метеорологической службы запрашивают давление воздуха в данный момент. С помощью настроечного потенциометра P_2 устанавливается, например, выходной сигнал $U_A = 10,05$ В, соответствующий измеренному в данный момент давлению 1005 мбар.

После такой процедуры калибровки на выходе схемы получается значение давления воздуха в данный момент. В этом случае изменению выходного напряжения на 10 мВ соответствует изменение давления воздуха на 1 мбар.

Если ожидаются довольно большие изменения температуры (например, $\Delta T \geq 20^{\circ}\text{C}$), то с помощью соответствующей схемы следует еще дополнительно компенсировать смещение нуля и изменение чувствительности.

3.3. Высотомер

Электронный высотомер действует аналогично барометру (разд. 3.2). Схема (рис. 3.3.1) выполнена таким образом, что усиленная примерно до 1,5 В раз-

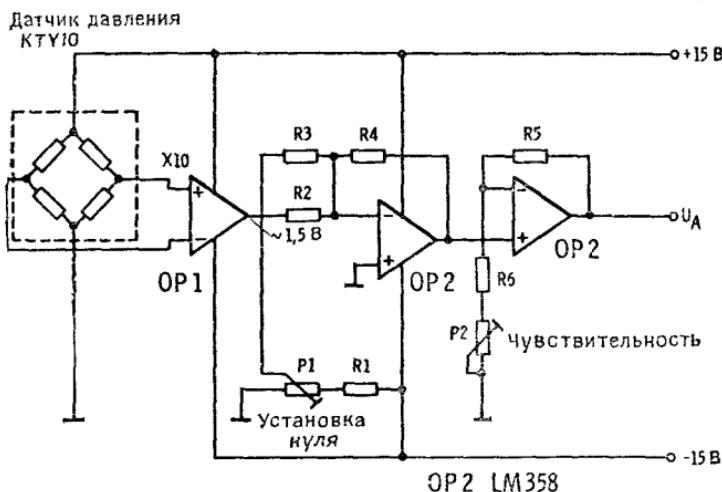


Рис. 3.3.1. Электронная схема высотомера с датчиком давления КПУ 10. Напряжение питания 15 В, стабилизированное; *OP* — операционный усилитель.

нность напряжений после *OP1* может быть установлена на нуль с помощью суммирующей схемы *OP2* и делителя напряжения R_1/P_1 . На втором каскаде усилителя *OP2* напряжение сигнала можно повысить примерно в 10 раз. Поскольку чувствительность моста

датчика давления (КТУ 10) составляет 150 мВ/бар, максимальная выходная чувствительность получается равной 15 В/бар. Если это выходное напряжение подать на цифровой вольтметр (трехзначный, 199 мВ), то теоретическая разрешающая способность получится равной 0,07 мбар/мВ. Здесь установка нуля осуществляется потенциометром P_1 , а регулировка чувствительности — потенциометром P_2 .

Калибровка

Калибровка электронного высотомера также осуществляется с помощью аппаратуры, показанной на рис. 3.2.2.

Сначала с помощью настроечного потенциометра P_1 выходное напряжение U_A устанавливается на нуль. Затем путем откачивания воздуха через выход U -образной трубки в датчике давления создается разрежение 25 мбар. Это показание прибора соответствует разности высот около 200 м. С помощью потенциометра P_2 выходное напряжение устанавливают примерно на 200 мВ (цифровой вольтметр 199). Выходное напряжение U_A цифрового прибора откалибровано теперь в метрах относительно нулевой высоты.

Для практической проверки можно определить изменение показаний при подъеме на заранее известную высоту (например, на высотное здание или на радиобашню).

ГЛАВА 4

ДАТЧИКИ РАСХОДА И СКОРОСТИ

В промышленной измерительной технике требуются очень точные методы определения расхода и скорости потока. При этом допустимые погрешности не должны превышать одного процента, а иногда и одной десятой процента. Довольно точные измерители расхода требуются иногда и в быту (например, газо-

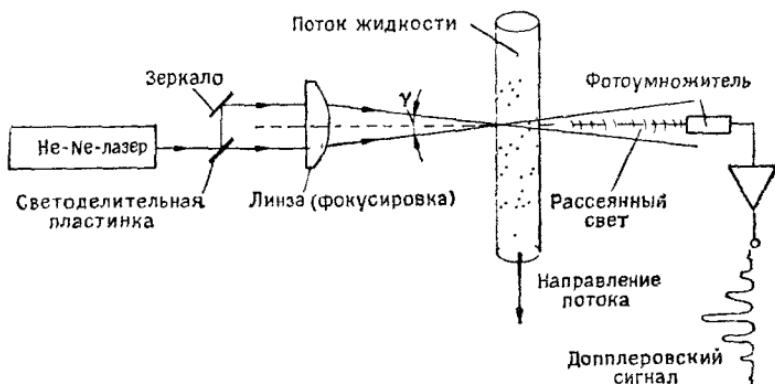


Рис. 4.1. Устройство лазерного допплеровского анемометра для измерения скоростей потоков в трубопроводе.

вый счетчик). При таких требованиях к точности применяют чаще всего механические измерительные приборы. Лишь в самое последнее время появились оптоэлектронные измерители расхода и скорости, работающие на оптическом эффекте Доппеля. Эти лазерные допплеровские анемометры (рис. 4.1) используют особый вид рассеяния света (эффект Доппеля), рассмотреть который более подробно здесь не представляется возможным. В данном случае луч

лазера разделяется светоделительной пластинкой на два отдельных световых пучка, которые фокусируются затем с помощью линзы в прстекающей среде. Рассекянный потоком свет попадает далее на фотодетектор (фотоумножитель), где он преобразуется в электрический ток. Усиленный допплеровский сигнал электронным путем преобразуется затем в пропорциональное расходу измерительное напряжение.

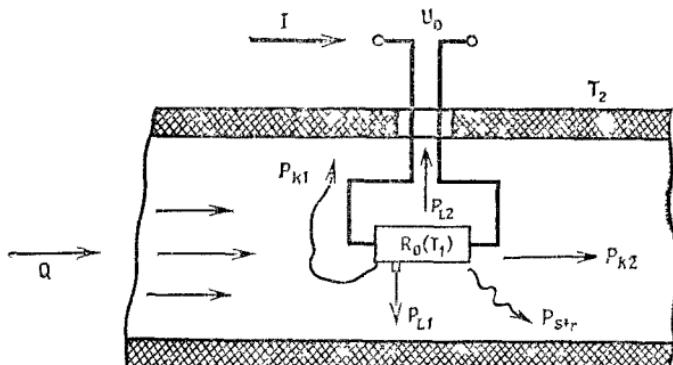


Рис. 4.2. Схематическое изображение процессов теплопередачи от самонагревающегося резистора в канале потока.

Такой способ измерения расхода довольно дорог, но его достоинство состоит в том, что поток не иска-жается процедурой измерения и профиль потока мо-жет быть измерен с очень хорошим разрешением, так как регистрируется только скорость в точке фокуса. Однако для любительской практики этот метод не-пригоден.

Измерения расхода можно осуществить чисто элек-тронным путем, применив в качестве датчика самона-гревающийся резистор. Сопротивление такого рези-стора изменяется вследствие охлаждения потоком, в ре-зультате чего резистор действует как датчик рас-хода. На рис. 4.2 показано омическое сопротивление (элемент датчика) в канале потока. Ток I нагревает этот элемент до температуры $T_1 > T_2$. В этих усло-виях теплоотвод осуществляется несколькими путями:

P_{L1} — теплопроводность через среду потока к стен-кам трубы; $P_{L1} \sim T_1$;

P_{L2} — теплопроводность через механический держатель и электропровода; $P_{L2} \sim T_1$;

P_{Str} — теплопередача путем излучения (по закону Стефана — Больцмана $P_{Str} \sim T_1^4$);

P_{K1} — теплопередача путем свободной конвекции; $P_{K1} \sim T_1$;

P_{K2} — теплопередача путем вынужденной конвекции (поток):

$$P_{K2} \sim T_1 \sqrt{Q},$$

где Q — объемный расход.

В итоге омический элемент датчика оказывается в состоянии теплового равновесия, т. е. количество подводимой энергии равно количеству отводимой.

Поскольку подводимая электрическая энергия равна $I^2R(T_1)$, равновесие определяется выражением

$$I^2R(T_1) = P_{L1} + P_{L2} + P_{Str} + P_{K1} + P_{K2},$$

где P_{K2} представляет собой собственно измеряемую величину, так как она определяется потоком в канале. Поэтому все остальные формы теплопередачи могут быть выражены константой. В этом случае получается так называемое уравнение Кинга

$$I^2R(T_1) = (\alpha_1 + \alpha_2 Q^n)(T_1 - T_2),$$

где $n = 0,5$. В этом уравнении α_1 и α_2 можно считать аппаратурными параметрами, остающимися постоянными в известных пределах.

4.1. Терморезисторный анемометр

Анемометром называют прибор для измерения потока, основанный как на электрическом (терморезисторный анемометр или анемометр с нагреваемой нитью), так и на механическом (анемометр с крыльчаткой) принципе действия. Описанный ниже анемометр с терморезистором в качестве чувствительного элемента предназначен для измерения слабых потоков воздуха.

Свойства терморезисторов уже описаны подробно в разд. 2.4. Для изготовления анемометров наиболее

пригодны терморезисторы в исполнении, показанном на рис. 2.4.2, *a*. Хотя типы терморезисторов, показанных на рис. 2.4.2, *в*, кажутся более подходящими из-за их малой массы, все же обращение с ними весьма затруднительно. Сопротивление терморезистора с отрицательным ТКС типа M85 (фирма Siemens) изменяется от 10 кОм при 20 °C до ≈ 1 кОм при 100 °C.

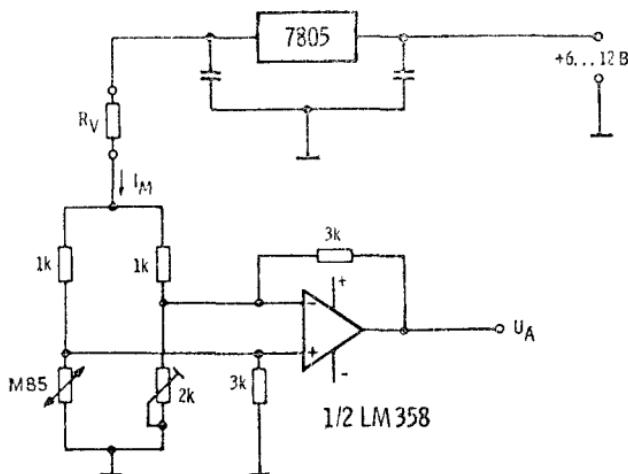


Рис. 4.1.1. Измерительная схема терморезисторного анемометра для измерения скорости воздуха: М85 — терморезисторный датчик.

Если рабочую температуру датчика принять равной 100 °C, то по вольт-амперной характеристике M85 для сопротивления 1 кОм измерительный ток получается равным ≈ 1 мА. На основании этого можно сконструировать схему типа показанной на рис. 4.1.1. Сопротивление моста составляет примерно 1 кОм. При постоянном (регулируемом) напряжении питания моста 5 В для $I_M = 2$ мА добавочное сопротивление R_V получается равным

$$R_V = \frac{5 \text{ В}}{2 \text{ мА}} - 1 \text{ кОм} = 1,5 \text{ кОм.}$$

Механическое устройство датчика такого анемометра показано на рис. 4.1.2. Чувствительный к по-

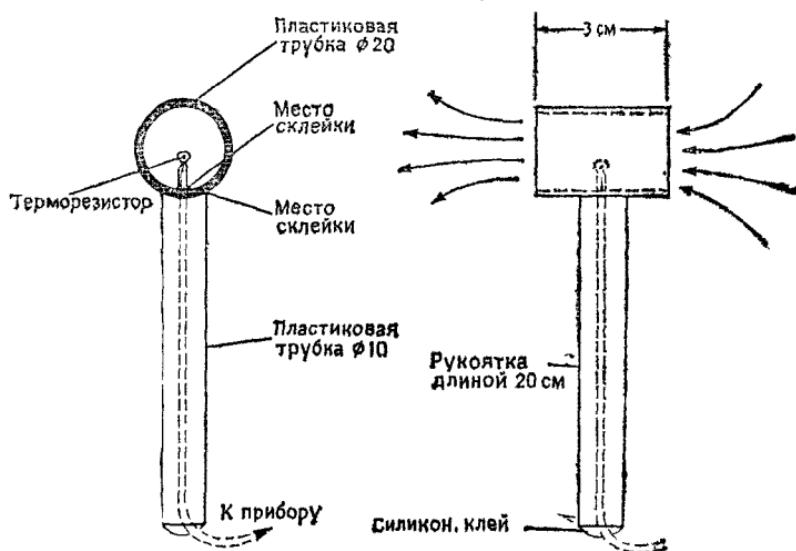


Рис. 4.1.2. Механическое устройство терморезисторного анемометра.

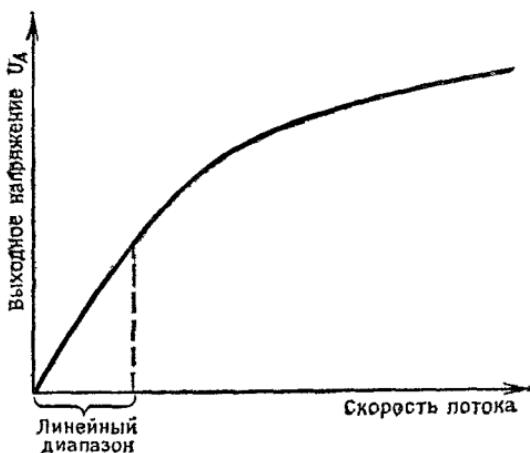


Рис. 4.1.3. Характеристика терморезисторного анемометра для прямоточных условий.

току терморезистор M85 находится в канале длиной около 3 см и внутренним диаметром около 2 см. Благодаря такой конструкции можно исключить возникновение налагающихся побочных потоков, способных искажить результаты измерений. Терморезистор с помощью клея (двухкомпонентный клей, например UHU-Plus) крепится на подставке в измерительной трубке, которая в свою очередь приклеивается ко второй трубке, используемой одновременно как рукоятка и как канал для электропроводов. Выходящий из рукоятки кабель фиксируется силиконовым клеем, чтобы исключить действие растягивающих нагрузок.

Характеристика изготовленного таким образом терморезисторного анемометра показана на рис. 4.1.3. Она получается на основании зависимости, определяемой уравнением Кинга и нелинейной характеристикой терморезистора.

4.2. Датчик расхода

Измерение расхода жидкостей или газов чрезвычайно важно во многих областях техники, так как оно позволяет судить об эффективности процессов по расходу материалов. На рис. 4.2.1 показана измерительная установка на основе автомобильного двигателя внутреннего сгорания. Здесь в карбюраторный двигатель непрерывно подаются кислород воздуха и топливо (бензин). Для достижения оптимального — прежде всего по количеству выхлопных газов — режима работы необходимо определенное соотношение подаваемых количеств воздуха и топлива. Это соотношение можно определить, например, путем измерения содержания СО датчиком 3 (см. разд. 5.3) при одновременном регулировании карбюратора. При различных режимах движения (езды по городу или по шоссе) это соотношение, разумеется, изменится, поэтому желателен такой контроль с помощью датчиков 1 и 2 в процессе движения. Датчиком 2 можно измерять также расход бензина (в литрах на 100 км пути) в данный момент и обеспечивать таким образом наиболее экономичный режим движения.

Принципиально способ действия этих датчиков (1 и 2) совпадает с описанным в разд. 4.1. Для измерения расхода по электротермическому принципу особенно подходят самонагревающиеся терморезисторные датчики с положительным ТКС на основе титаната бария.

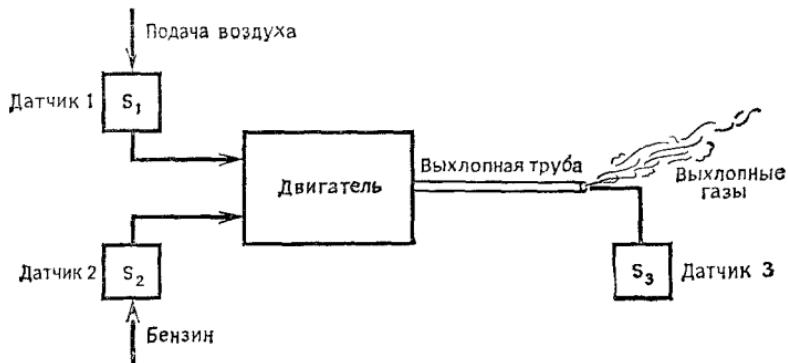


Рис. 4.2.1. Подача воздуха (датчик 1) и бензина (датчик 2) к автомобильному двигателю внутреннего сгорания.

Как уже было показано в разд. 2.5, в случае самонагревающихся терморезисторов с положительным ТКС устанавливается постоянная температура, зависящая от материала используемого терморезистора. При использовании двух терморезисторов с положительным ТКС, из которых только один подвергается действию потока, как показано на рис. 4.2.2, можно осуществить измерение, в значительной мере не зависящее от температуры скружающей среды. При этом поток Q можно вычислить по формуле

$$Q = \left[\frac{1}{K_2} \left(\frac{U I}{T_N - T_U} - K_1 \right) \right]^n,$$

где K_1 и K_2 — приборные константы, U — напряжение, I — ток, T_N — температура чувствительного элемента, T_U — температура окружающей среды, $n \approx 0,5$.

Электрическая схема приведена на рис. 4.2.3. Она состоит из измерительного моста, включающего в себя оба терморезистора 1 и 2, а также добавочные

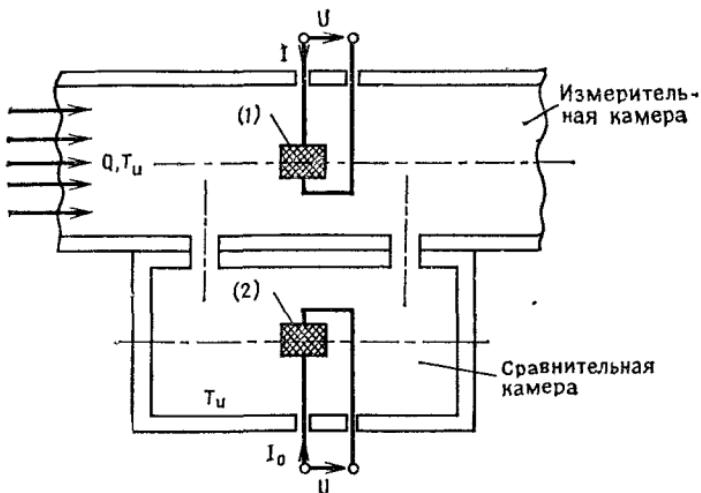


Рис. 4.2.2. Устройство для измерения расхода газа с помощью самонагревающегося терморезистора с положительным ТКС.

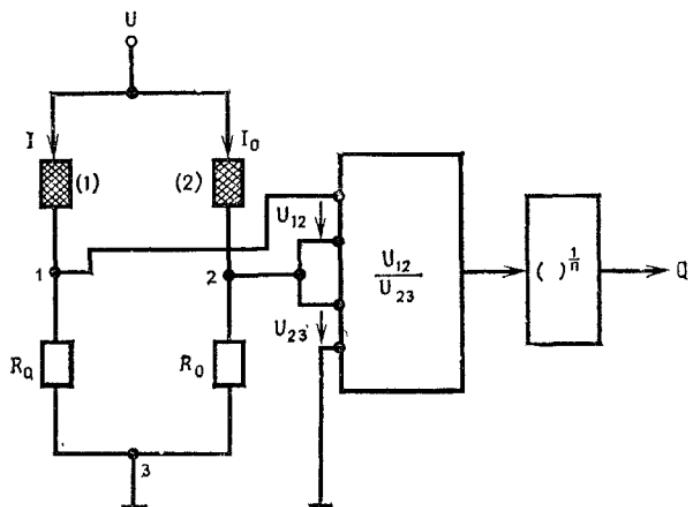


Рис. 4.2.3. Измерительная схема датчика расхода с блоком формирования отношения U_{12}/U_{23} и блоком линеаризации.

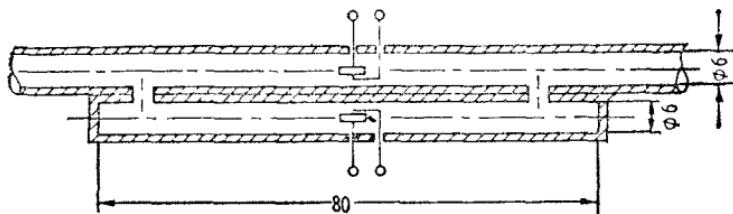


Рис. 4.2.4. Практическое устройство датчика расхода.

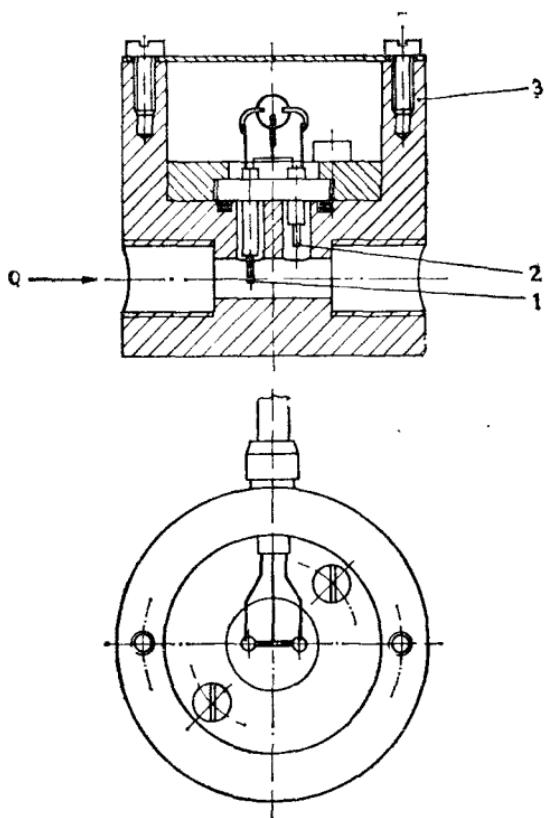


Рис. 4.2.5. Промышленный датчик расхода типа DFA (фирма Leybold-Heraeus).

сопротивления R_Q и R_0 . Путем деления напряжений U_{12} и U_{23} получают значение Q^n . В следующем линеаризующем каскаде эта величина преобразуется в фактический поток Q .

На рис. 4.2.4 изображено реальное устройство такого датчика расхода. Он действует по электротермии-

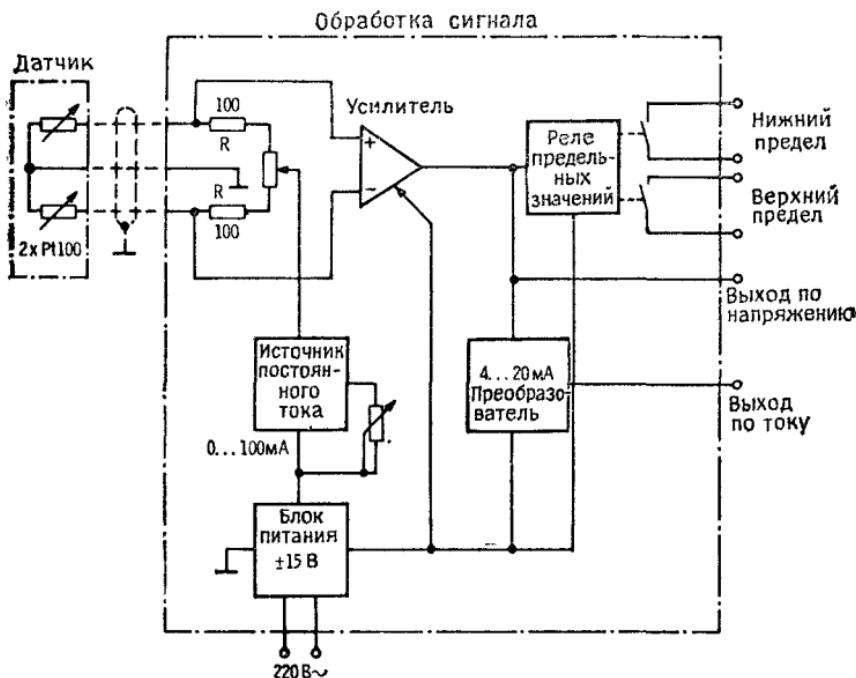


Рис. 4.2.6. Обработка сигнала датчика расхода.

ческому принципу и включает в себя два терморезистора с положительным ТКС типа Р310-А11 (Siemens). Терморезисторы размещены каждый в отдельной трубе диаметром 6 мм. Опорная ветвь замкнута с обеих сторон и пропускает лишь слабый обводной поток, тогда как в измерительной ветви поток проходит беспрепятственно. Общая длина датчика составляет примерно 12 см.

При напряжении питания $U = 12$ В и температуре среды 20°C для такой конструкции в случае про-

пускания бензина получаются следующие константы:

$$K_1 = 13,2 \text{ мВт/К}, K_2 = 4,5 \text{ мВт/[К (л/ч)ⁿ]}, n = 0,48.$$

Для вычислительной электроники пригодны общепотребительные аналоговые компоненты. Например, для получения частного может быть использована интегральная схема ICL 8013 (фирма Intersil), а для линеаризации — 4302 (фирма Burr-Brown).

На рис. 4.2.5 показан более сложный датчик, действующий по аналогичному принципу. Из двух чувствительных элементов (резисторы Pt-100) также лишь один омывается потоком (1), тогда как опорный элемент (2) находится в глухом отверстии и не подвержен действию потока. Вся головка датчика помещена в массивный металлический блок (3). Схема обработки сигнала этого прибора (рис. 4.2.6) состоит из измерительно-го моста с резисторами Pt-100 и усилителя, повышающего выходное напряжение до 0...10 В.

Измерительный мост питается постоянным током ≈ 100 мА. Характеристика этого датчика (рис. 4.2.7) криволинейна и при различных температурах соответствует различной чувствительности. Благодаря прямому воздействию потока на чувствительный элемент датчик имеет очень малое время срабатывания, что видно на рис. 4.2.8. При резком изменении скорости потока воздуха от 0 до 1 л/мин, например, проходит всего около 3 с до достижения 90 % окончательного показания. Такого рода датчики

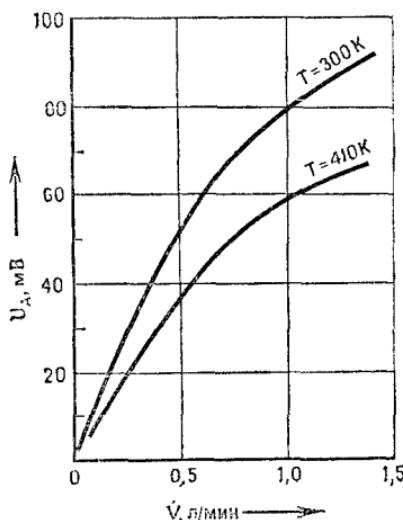


Рис. 4.2.7. Характеристики датчика расхода при различных температурах окружающей среды.

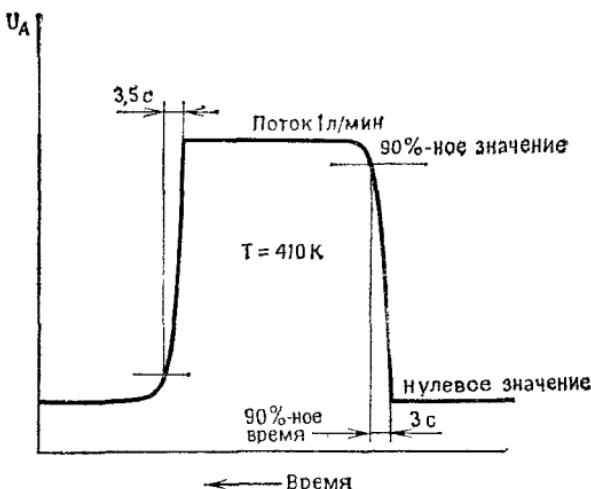


Рис. 4.2.8. Характеристики срабатывания датчика расхода.

применяются в различных технологических устройствах для измерения или контроля расхода газа.

4.3. Датчик направления

Вышеописанные датчики расхода и скорости независимо от направления потока всегда показывали одинаково положительное напряжение. Используя два взаимосвязанных датчика, можно сконструировать датчик расхода, который будет формировать либо положительное, либо отрицательное выходное напряжение в зависимости от направления потока. Конструкция такого датчика направления изображена на рис. 4.3.1. Он состоит из двух терморезисторных бусинок 1 и 2, напаянных на двустороннюю печатную плату. В месте размещения терморезисторов в плате выполнено отверстие, через которое может проходить поток. На каждой стороне платы находится еще по специальной насадке, служащей для механической защиты терморезистора и для придания определенной формы потоку. Все устройство соединяется на клею. Выводы терморезистора выводятся через места склеивания. Оба терморезистора находятся в

одном плече измерительного моста (рис. 4.3.2), питаемого постоянным напряжением. С помощью добавленного

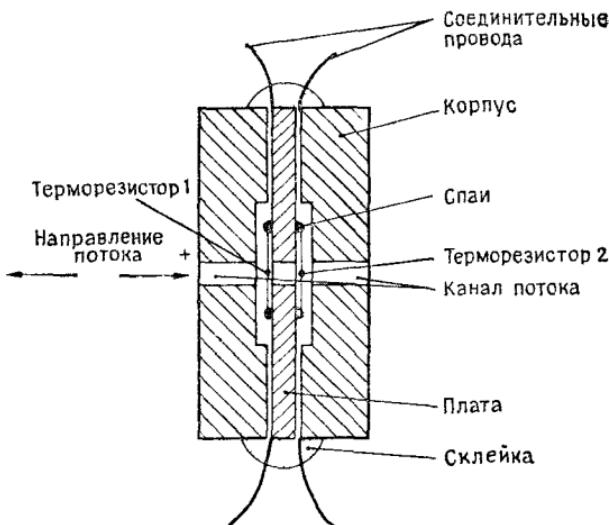


Рис. 4.3.1. Механическое устройство датчика направления на терморезисторах.

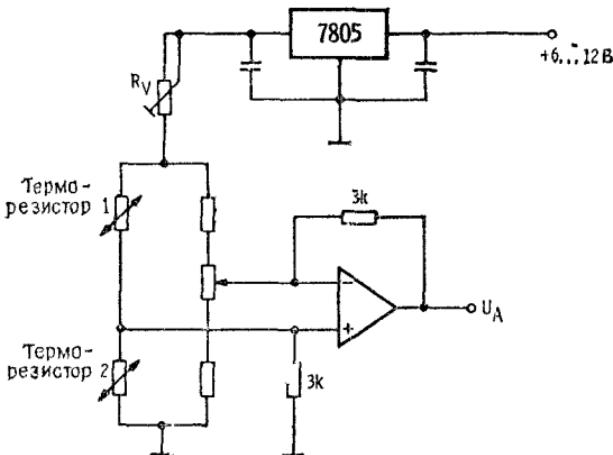


Рис. 4.3.2. Обработка сигнала датчика направления.

вочного сопротивления R_V можно установить избыточную температуру терморезисторов. Если теперь поток проходит через датчик в положительном направ-

лении (на рис. 4.3.1 слева направо), то терморезистор 1 будет охлаждаться и одновременно вследствие их термической связи терморезистор 2 будет нагреваться по сравнению с терморезистором 1.

В результате возникает положительное выходное напряжение. В противном случае, когда поток проходит в отрицательном направлении, температура тер-

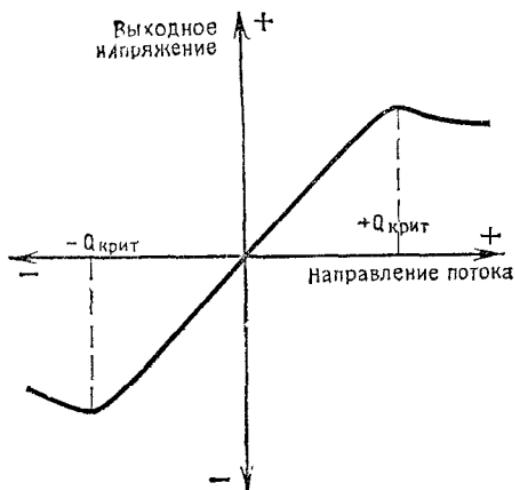


Рис. 4.3.3. Характеристика датчика направления с отрицательным выходным напряжением для потоков в отрицательном направлении.

морезистора 1 выше, чем терморезистора 2, так что в результате возникает отрицательное выходное напряжение. На характеристике датчика (рис. 4.3.3) еще раз проиллюстрировано это зависящее от направления действие датчика. При потоках выше определенного критического значения ($Q_{\text{крит}}$) вследствие чрезмерного охлаждения выходное напряжение начинает медленно падать, правда, без изменения знака.

ГЛАВА 5

ГАЗОВЫЕ ДАТЧИКИ

Обнаружение различных газов в помещениях или в составе выхлопных газов осуществляется с помощью газовых датчиков. В присутствии определенных газов (например, CO_2 , CO , O_2 или H_2) они вырабатывают электрические сигналы, которые более или менее специфичны для различных веществ. При этом используются различные физические и химические эффекты, которые более или менее подробно будут описаны ниже. Кроме этих простых и надежных газовых детекторов для более ответственных применений существуют еще оптические фотометры, превосходящие газовые детекторы по селективности и точности. Правда, они гораздо дороже и сложнее по устройству.

Для простых применений, когда можно обойтись умеренной точностью и селективностью, применяют следующие устройства:

- термокондуктометрические ячейки (CO_2 , SO_2 , SF_6);
- термохимические (кatalитические) ячейки (CO , взрывоопасные и горючие газы);
- полупроводниковые датчики (спирты, H_2S , углеводороды, токсичные газы);
- топливные ячейки (кислород).

5.1. Термокондуктометрические ячейки

Эти датчики пригодны для обнаружения H_2 , CO_2 , SO_2 , а также горючих и взрывоопасных газов. Принцип действия (рис. 5.1.1) состоит в следующем.

Исследуемая проба газа диффундирует в измерительную камеру, в которой имеется платиновая или

никелевая проволочная спираль, нагретая до температуры примерно на 40°C выше окружающей. Если состав газовой пробы изменится, то изменится также теплоотвод от нагретой спирали к стенкам ячейки. В случае диоксида углерода (CO_2) при этом происходит повышение температуры спирали, так как теплопроводность CO_2 незначительна. В случае натекания в ячейку водорода (H_2) спираль охладится вследствие его высокой теплопроводности. Охлаждение

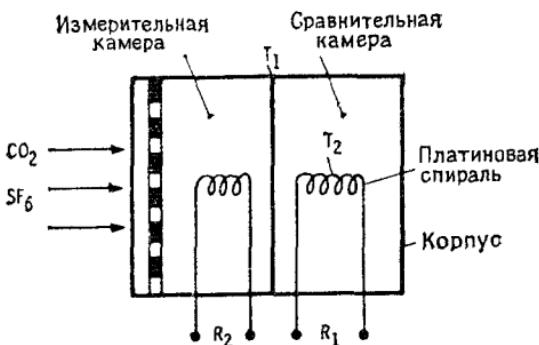


Рис. 5.1.1. Термокондуктометрическая измерительная ячейка.

или нагрев спирали ведет к изменению ее сопротивления, которое сопоставляется в измерительном мосте со вторым — эталонным — сопротивлением, расположенным в сравнительной камере.

Сигнал датчика определяется изменением теплопроводности газовой смеси, а поскольку одинаковый тепловой эффект может быть обусловлен смешением разных газов, но в соответственно разных количествах, применение датчика ограничено только анализом бинарных смесей заранее известных газов. Для анализа смесей из трех и более газов данный способ непригоден.

Типичные диапазоны измерения концентрации для некоторых газов приведены в табл. 5.1.1. Теплопроводность различных газов при разных температурах указана в табл. 5.1.2. Чем больше различие в теплопроводности двух газов, тем точнее их можно проанализировать. В табл. 5.1.2 в процентах указана также

Таблица 5.1.1.

Диапазоны измерения концентрации некоторых газов

	Гиперийный диапазон, %	Минимальный диапазон, %
Диоксид углерода, CO ₂	0 ... 100	0 ... 5
Диоксид серы, SO ₂	0 ... 100	0 ... 5
Водород, H ₂	0 ... 100	0 ... 1

Таблица 5.1.2.

Теплопроводность некоторых газов при 0 °C и 100 °C

	Теплопроводность, λ , мкВт·см ⁻¹ К ⁻¹		Относительная теплопроводность (%) по сравнению с воздухом	
	0 °C	100 °C	0 °C	100 °C
Воздух	241	314	1,00	1,000
Ацетон	97,8	—	0,406	—
Ацетилен	186	303	0,772	0,965
Этан	183	316	0,759	1,006
Этилен	175	310	0,726	0,987
Окись этилена	(93)	193	(0,390)	0,615
Аммиак	216	332	0,896	1,057
Аргон	164,8	301,4	0,684	0,960
Бензол	(89)	165	(0,370)	0,525
Бутиадиен-(1,3)	(122)	—	(0,510)	—
Бутан	135	245	(0,560)	0,780
Хлор	77,8	—	0,323	—
Диоксид азота	153	236	0,635	0,752
Фреон 12	82,9	—	0,344	—
Гелий	1430	1740	5,934	5,540
Гептан	—	176	—	0,561
Гексан	(120)	202	(0,500)	0,643
Диоксид углерода	145	223	0,602	0,710
Оксид углерода	231	304	0,959	0,968
Криптон	87,8	116	0,364	0,369
Метан	303	442	1,257	1,408
Бромистый метил	61,9	—	0,257	—
Неон	461	571	1,913	1,818
Пентан	(130)	228	(0,540)	0,726
Пропан	151	272	0,627	0,866
Пропилен	140	—	0,581	—
Кислород	245	318	1,017	1,013
Диоксид серы	86,2	138	0,358	0,439
Азот	240	308	0,996	0,981
Водяной пар	—	246	—	0,783
Водород	1710	2110	7,100	6,720

относительная теплопроводность по сравнению с воздухом (смесь азота с кислородом). Максимальная разница по сравнению с воздухом получается у гелия и водорода, содержание которых может быть очень хорошо проанализировано термокондуктометрическим методом.

5.2. Топливная ячейка

Для оценки натекания воздуха по содержащемуся в нем кислороду (≈ 20 об. %) применяют датчики с топливной (электрохимической) ячейкой. В такой

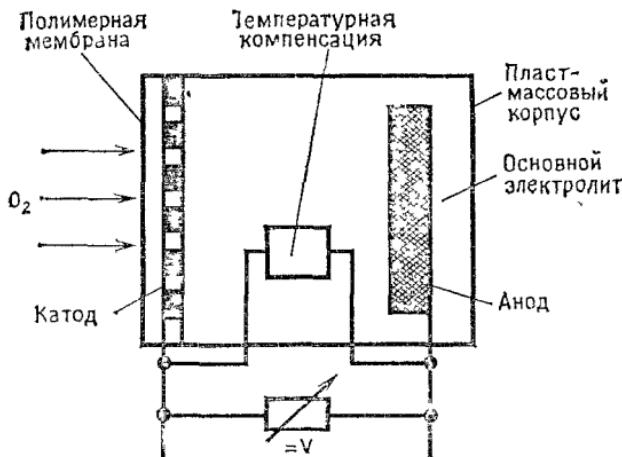


Рис. 5.2.1. Топливная (электрохимическая) измерительная ячейка для измерения кислорода.

ячейке обладающий большой поверхностью электропроводящий материал расположен между электролитом и атмосферным воздухом. В присутствии кислорода происходит окисление активной поверхности этого материала с выделением тепла, в результате чего возникает ощущимый электрический сигнал, который может быть измерен. Устройство такой ячейки схематически показано на рис. 5.2.1. В результате химической реакции с кислородом в измерительной ячейке между катодом и анодом возникает измерительное напряжение, возрастающее пропорционально

содержанию кислорода в окружающей атмосфере. Реакция протекает очень быстро, поэтому сразу же определяется содержание кислорода в данный текущий момент. Температурная компенсация, осуществляемая внутри измерительной ячейки, стабилизирует выходной сигнал по отношению к температуре. При определении содержания кислорода в помещении типичный диапазон измерений соответствует 0...21 %.

5.3. Термохимическая (катализитическая) ячейка

Термохимическая ячейка обеспечивает часто необходимую потребность в измерении содержания горючих газов — особенноmonoоксида углерода (CO) — в окружающем воздухе или в автомобильных выхлопных газах.

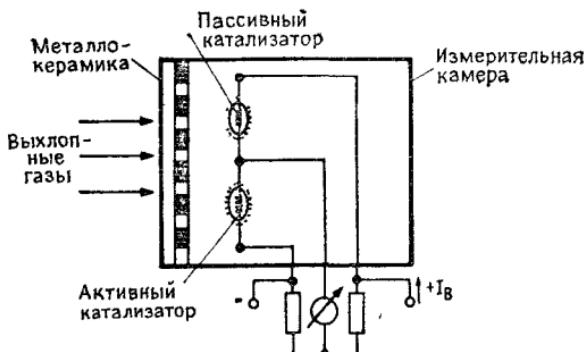


Рис. 5.3.1. Катализитическая ячейка для обнаружения горючих газов.

Термохимическая ячейка (рис. 5.3.1) имеет две измерительные платиновые спирали, включенные в измерительный мост, содержащий еще два постоянных сопротивления. Если одну из спиралей покрыть слоем активного катализатора, а вторую — слоем пассивного катализатора, то находящийся в атмосфере monoоксид углерода (CO) будет реагировать с кислородом воздуха на активном катализаторе, образуя диоксид углерода (CO_2). Выделяющаяся в результате этой реакции тепловая энергия вызывает повышение сопротивления активной спирали, а в итоге —

заметный разбаланс моста. С помощью такого датчика можно обнаруживать весьма незначительные концентрации CO порядка $10^{-4}\%$. В атмосфере помещения минимальный возможный уровень измерения составляет $2 \cdot 10^{-2}\%$ CO. В принципе, кроме CO, с помощью этой ячейки могут быть обнаружены все горючие газы. Соответствующим подбором катализатора и температуры проволоки можно достигнуть определенной избирательности.

Область применения датчиков этого типа включает в себя контроль таких объектов, как гаражи, уличные туннели, стенды для испытания автомобилей и двигателей, убежища, склады, рабочие помещения, бомбоубежища гражданской обороны, коксовые установки.

Анализатор выхлопных газов

Контроль выхлопных газов на содержание CO регулярно проводится в ФРГ службой технического надзора с целью защиты окружающей среды. Для автомобильных выхлопных газов максимально допустимое содержание CO составляет около 4 %. Обычноmonoоксид углерода образуется при сгорании бензина в двигателе при недостаточной подаче кислорода. При избытке кислорода образуется почти исключительно диоксид углерода (CO_2), который в противоположность monoоксиду не является вредным газом. Если при сгорании топлива в двигателе ощущается недостаток кислорода, то специалисты говорят об обогащении рабочей смеси. При избытке кислорода получается соответственно обедненная смесь. Для обеспечения хорошего КПД содержание CO следует поддерживать по возможности низким, что может быть достигнуто работой на обедненной смеси.

Разумеется, при этих условиях образуются и несгоревшие углеводороды, которые также вредны для здоровья. Оптимальный режим работы карбюратора соответствует содержанию CO около 1 % (рис. 5.3.2). Для измерения этого показателя особенно подходит термохимический метод, отличающийся дешевизной и надежностью.

Схема такого анализатора выхлопных газов очень проста (рис. 5.3.3). Измерительные спирали 1 (активный катализатор) и 2 (пассивный катализатор) расположены в измерительном мосте, который через регулятор напряжения (например, LM317) питается от

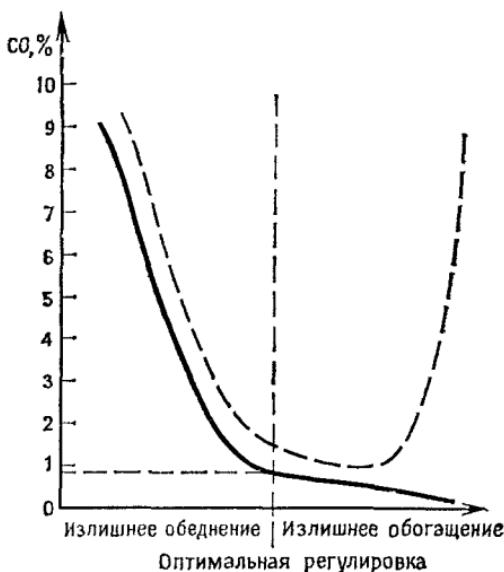


Рис. 5.3.2. Зависимость концентрации СО от регулировки карбюратора: прерывистая линия — содержание углеводородов (без масштаба).

аккумулятора автомобиля. Напряжение питания моста устанавливается равным примерно 3 В. Уравновешивание нулевой точки осуществляется настроенным потенциометром (1 кОм), включенным параллельно измерительному мосту. Разность напряжений ΔU_D измеряется непосредственно аналоговым индикатором. Переключатель S_1 служит для переключения предела измерения с 5 % на 10 %. Показания прибора на каждой ступени корректируются с помощью настроенных потенциометров P_1 и P_2 . Процедура измерения (рис. 5.3.4) включает в себя следующие этапы:

- взятие пробы измерительным зондом,
- отделение конденсата в осушителе,
- транспортировка газа,
- фильтрация газа,
- анализ газа.

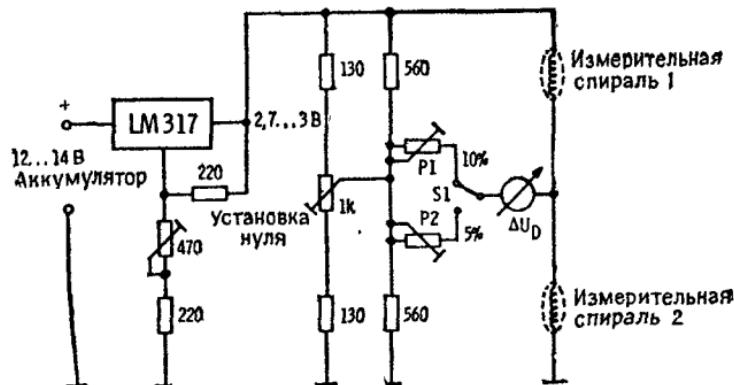


Рис. 5.3.3. Принципиальная схема анализатора выхлопных газов.

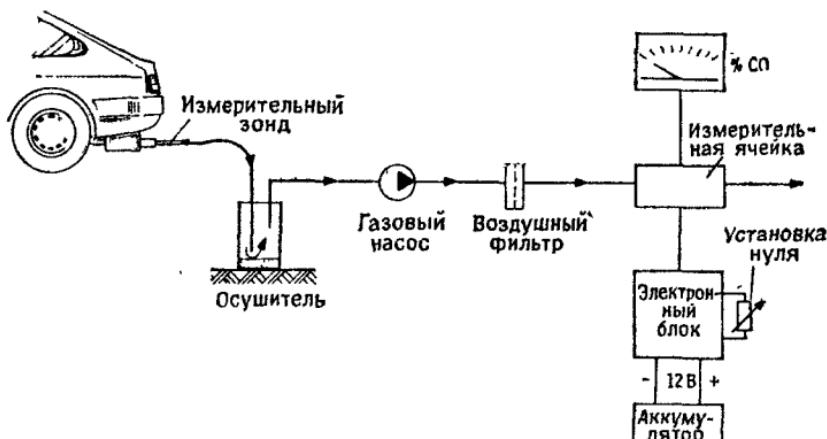


Рис. 5.3.4. Блок-схема установки для определения содержания СО в автомобильных выхлопных газах.

При взятии пробы металлическую трубку длиной около 30 см вводят в выхлопную трубу во избежание подсоса постороннего воздуха. Анализируемый газ направляется затем по шлангу в отделитель конден-

сата, чтобы в датчик не попадала сконденсированная влага. Транспортировка газа осуществляется с помощью мембранных насосов типа применяемых, например, для подачи воздуха в аквариум. Затем анализируемый газ должен быть очищен от случайных частиц пыли. В качестве фильтрующего элемента можно применять, например, топливный фильтр. Только после этого анализируемый газ направляется в ячейку датчика, где собственно и происходит анализ. Из-за большой длины шланга предварительная обработка газа длится около 0,5 мин, после чего можно снимать показания прибора.

В описанном виде комплектная установка может быть приобретена как единый блок. В частности, она поставляется фирмой Brüting Meßtechnik, г. Гольдбах, ФРГ.

Перед началом использования прибора его следует испытать на эталонном газе, чтобы осуществить необходимые регулировки с помощью подстроечных потенциометров P_1 и P_2 . Контрольная проба газа также входит в комплект поставки прибора.

5.4. Полупроводниковые датчики

В самых простых и дешевых газовых датчиках используется изменение электрического сопротивления некоторых полупроводниковых материалов, возникающее вследствие адсорбции газа. На рис. 5.4.1 показано принципиальное устройство такого полупроводникового датчика. Он состоит из керамической основы, способной выдерживать нагрев до 100...500 °C. На этой керамической основе находятся два электрода, между которыми наносится полупроводящий оксид металла. Если газ проходит над этим активированным слоем оксида металла, то проводимость последнего изменяется. С помощью мостовой схемы это изменение проводимости преобразуется в изменение напряжения. В табл. 5.4.1 приведены сведения о материалах чувствительных элементов некоторых датчиков для обнаружения различных газов. Важнейшим среди них является диоксид олова SnO_2 с

различными легирующими добавками. Подбором легирующей добавки и рабочей температуры можно достигнуть определенного повышения избирательности. На рис. 5.4.2 показана зависимость чувствительности

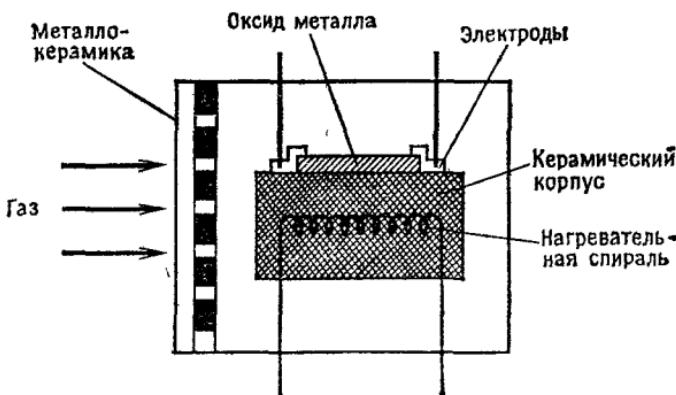


Рис. 5.4.1. Измерительная ячейка полупроводникового датчика для обнаружения вредных (токсичных) газов.

$(\Delta I/I)$ для концентраций $10^{-2} \%$ CO и 1% CH₄ от вида легирующей добавки и рабочей температуры.

Таблица 5.4.1

Анализируемое вещество	Чувствительный элемент датчика
Оксид углерода, CO	Напыленные в кислороде слои SnO ₂ ; рабочая температура 250...500 °C
Этанол, C ₂ H ₅ OH	Нанесенные пиролитически слои SnO ₂ на кварцевых подложках; спеченная деталь из ZnO с добавкой серебра
Сероводород, H ₂ S	Слой SnO ₂ с добавкой алюминия
Изобутан, C ₄ H ₁₀	Слой легированного ZnO на подложке из Al ₂ O ₃ и слой катализатора из соединения платины
Пропан, C ₃ H ₈	SnO ₂ + 1 % PdCl ₂ + Mg(NO ₃) ₂ с добавками Nb (V, Ti, Mo)
Водород, H ₂	Напыленный слой SnO ₂ с добавкой 1 % Sb ₂ O ₃

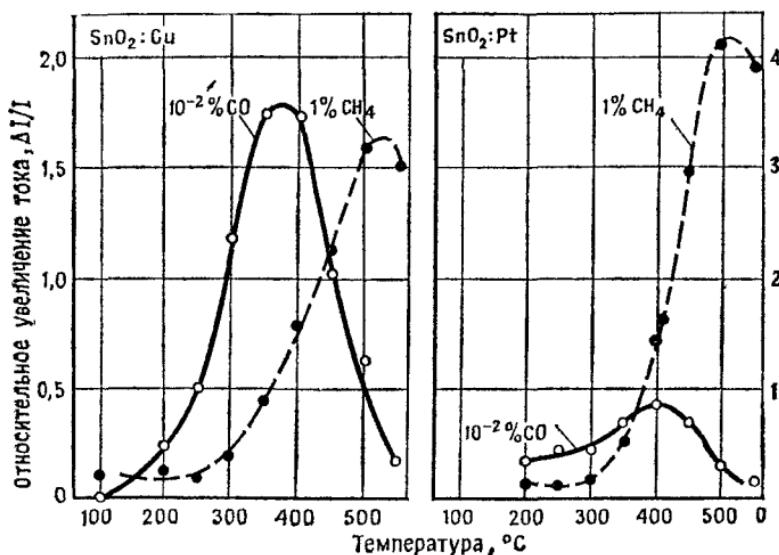


Рис. 5.4.2. Оптимизация характеристик газового датчика на основе диоксида олова с помощью различных легирующих добавок (медь и платина).

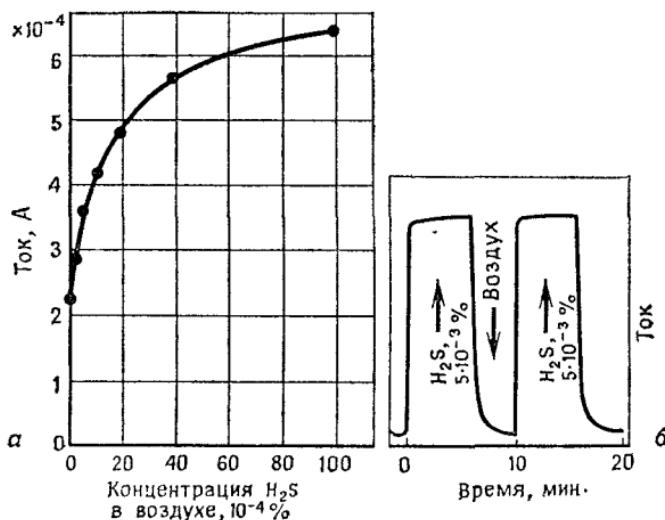


Рис. 5.4.3. Характеристика срабатывания газового датчика на основе диоксида олова SnO_2 при 200°C : а — влияние концентрации H_2S ; б — время срабатывания датчика.

При легировании медью оптимальная чувствительность, например, для CO получается при 370 °C. В случае метана оптимальная чувствительность до-

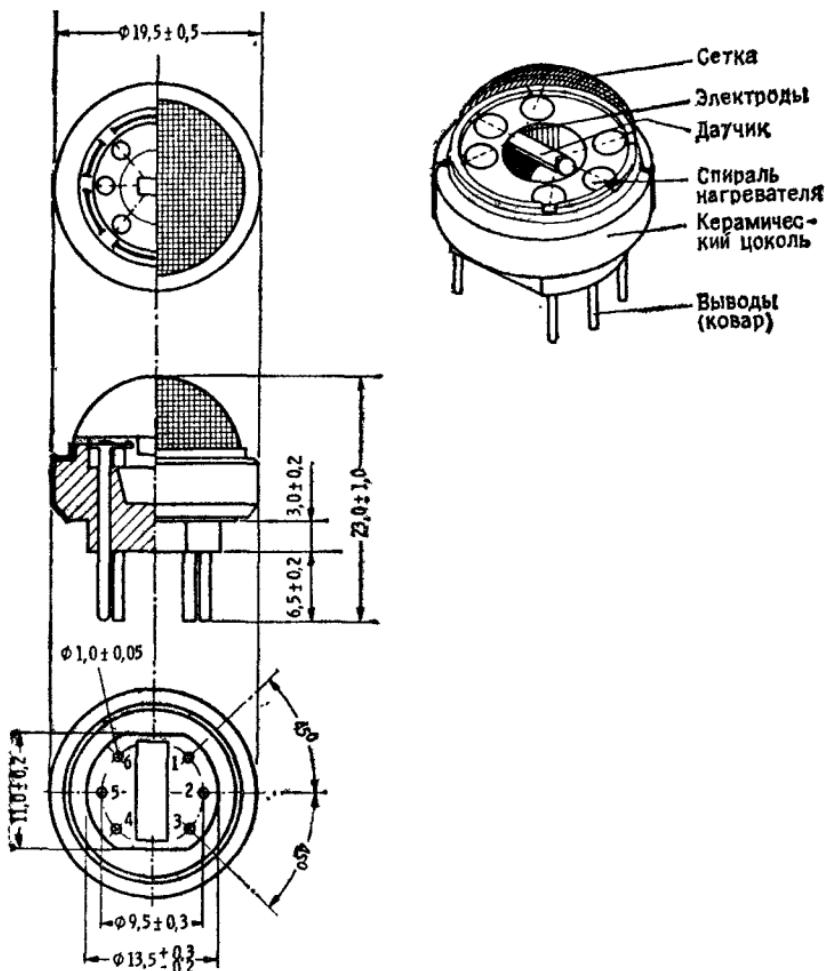


Рис. 5.4.4. Конструкция промышленного газового датчика типа TGS.

стигается при легировании платиной и работе при температуре 500 °C. На основании этого получаются два датчика, которые в определенных случаях применения обеспечивают селективную индикацию.

Газовый датчик с высокой селективностью получается для сероводорода (H_2S). Характеристика датчика на основе нелегированного SnO_2 приведена на рис. 5.4.3, а. При концентрации $(0...20) \cdot 10^{-4} \%$ H_2S в воздухе она имеет круто нарастающий ход, который затем замедляется. Рабочая температура датчика этого типа равна $200^\circ C$, поскольку H_2S легко разлагается на поверхности диоксида олова. Используя очень тонкие активные слои SnO_2 толщиной около 150 нм, получают малые длительности срабатывания, находящиеся в секундном диапазоне (рис. 5.4.3, б).

Датчики типа TGS

Наиболее значительным производителем полупроводниковых газовых датчиков является японская фирма Figaro Inc. Она имеет обширный ассортимент га-

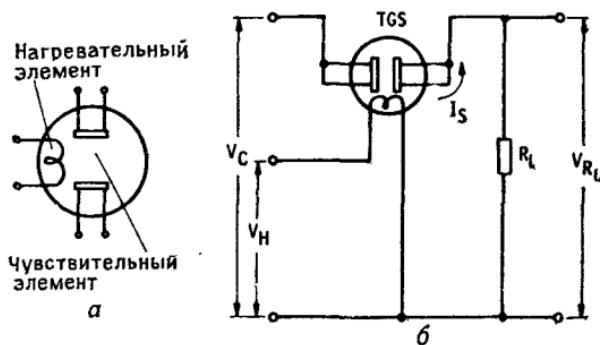


Рис. 5.4.5. Расположение контактов (а) и схема включения (б) газового датчика типа TGS.

зовых датчиков для различных применений, в том числе и довольно недорогих, представляющих интерес также и для любительских схем. На рис. 5.4.4 показан такой датчик типа TGS фирмы Figaro. Он состоит из керамической трубочки, нагреваемой изнутри тонкой проволокой. Снаружи на трубочку нанесен активный слой с электродами. Весь датчик защищен проволочной сеткой из нержавеющей стали от механических повреждений. Обозначение такого датчика на схемах и способ его подключения показаны на рис. 5.4.5.

Датчик нагревается напряжением V_H до температуры выше 200 °C. Напряжение питания V_C обусловливает падение напряжения V_{RL} на нагрузочном резисторе R_L , причем величина V_{RL} зависит от изменившегося тока датчика I_S . Чувствительность датчика TGS 815D для различных газов показана на

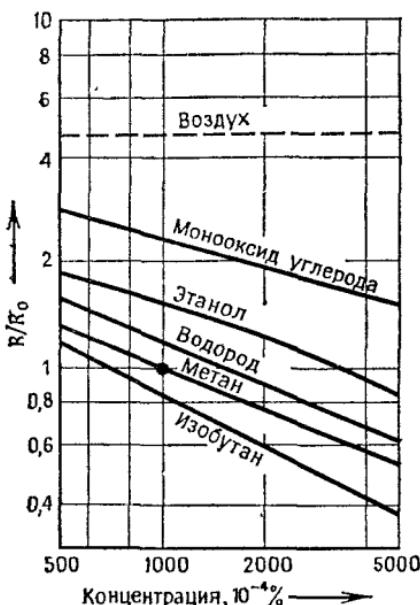


Рис. 5.4.6. Чувствительность датчика TGS к различным газам.

сти датчик TGS 815D является оптимальным вариантом среди детекторов фирмы Figaro.

Долговременная стабильность этих датчиков при эксплуатации сохраняется почти постоянной в течение нескольких лет (рис. 5.4.8), так что дополнительная калибровка оказывается не обязательной.

Датчик природного газа

В домах, где приготовление пищи и отопление осуществляются с использованием природного газа, существует опасность взрыва из-за неконтролируемой утечки газа. Непрерывно работающий датчик при-

рис. 5.4.6. Здесь R_0 — сопротивление датчика в смеси воздух + 0,1 % метана, а R — сопротивление датчика при различных концентрациях газов. Изменение чувствительности R/R_0 в зависимости от температуры и относительной влажности показано на рис. 5.4.7 для датчиков одного типа. Здесь R_0 — сопротивление датчика в стандартной смеси воздуха с 0,1 % метана при относительной влажности 65 % и температуре 20 °C, а R относится к переменным условиям по температуре и влажности. По чувствительности к влиянию температуры и влажно-

родного газа эту опасность может существенно ограничить. Решающим для взрыва газа является нижний предел взрываемости, который для природного

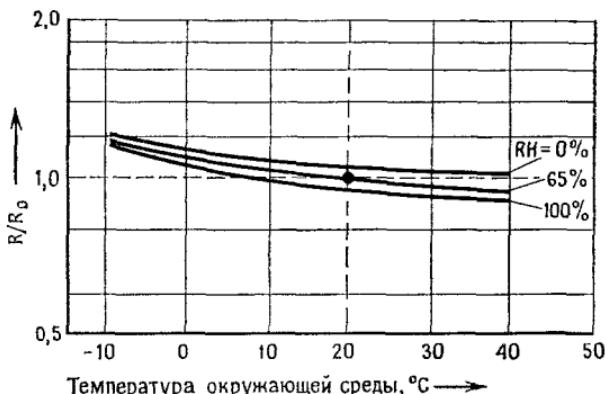


Рис. 5.4.7. Зависимость отношения R/R_0 от температуры и относительной влажности (RH) окружающей среды.

газа или для смеси пропана с бутаном равен 2 % в смеси с воздухом. В табл. 5.4.2 приведены пределы

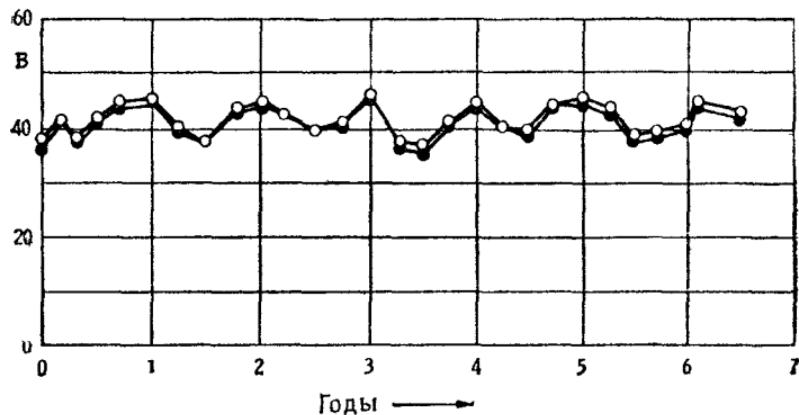


Рис. 5.4.8. Долговременная стабильность газовых датчиков типа TGS.

взрываемости некоторых практически важных газов. Поскольку чувствительность срабатывания датчиков типа TGS не превышает 0,1 %, обеспечивается надежное обнаружение утечки. Принципиальное устрой-

Таблица 5.4.2

Вещество	Химическая формула	Относительная плотность *	Пределы взрываемости, %
Метан	CH ₄	0,6	5 ... 15
Этан	C ₂ H ₆	1,0	3 ... 12,4
Пропан	C ₃ H ₈	1,6	2,1 ... 9,5
Бутан	C ₄ H ₁₀	2,0	1,8 ... 8,4
Пентан	C ₅ H ₁₂	2,5	1,4 ... 7,8
Гексан	C ₆ H ₁₄	3,0	1,2 ... 7,4
Гептан	C ₇ H ₁₆	3,5	1,0 ... 6,7
Октан	C ₈ H ₁₈	3,9	0,9 ... 6,5
Декан	C ₁₀ H ₂₂	4,9	0,7 ... 5,6
Бензол	C ₆ H ₆	2,8	1,2 ... 8,0
Толуол	C ₇ H ₈	3,1	1,2 ... 7,1
Ксиол	C ₈ H ₁₀	3,7	1,0 ... 7,2
Метиленхлорид	CH ₂ Cl ₂	2,9	13 ... 22
Метанол	CH ₄ O	1,1	5,5 ... 37
Этанол	C ₂ H ₆ O	1,6	3,3 ... 19
Пропанол	C ₃ H ₈ O	2,1	2 ... 14
Бутанол	C ₄ H ₁₀ O	2,6	1,4 ... 12
Метиловый эфир	C ₂ H ₆ O	1,6	3,4 ... 18
Ацетон	C ₃ H ₆ O	2,0	2,1 ... 13
Этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	3,0	2,1 ... 11,5
Оксид углерода	CO	1,0	12,5 ... 74
Водород	H ₂	0,07	4 ... 75

* По сравнению с воздухом.—Прим. перев.

ство подобной схемы показано на рис. 5.4.9. Она состоит в основном из моста Уитстона, питаемого источником постоянного напряжения (7805). В качестве активного элемента в мосте используется датчик TGS 813С, предназначенный для обнаружения взрывоопасных газов. Выходной сигнал моста поступает затем на компаратор (например, ИС М51204L), который при превышении некоторого определенного выходного напряжения, устанавливаемого с помощью потенциометра R_s , отпирает транзистор (2SD471). Этот сигнал включения можно использовать затем для управления аварийной сиреной или вентилятором подачи воздуха в загазованное помещение. В табл. 5.4.3 представлены области применения неко-

торых датчиков типа TGS. В принципе все эти датчики можно использовать для решения различных задач с использованием схемы, приведенной на рис. 5.4.9.

Анализатор следов алкоголя

Полупроводниковые газовые датчики серии TGS можно применять также для анализа на содержание

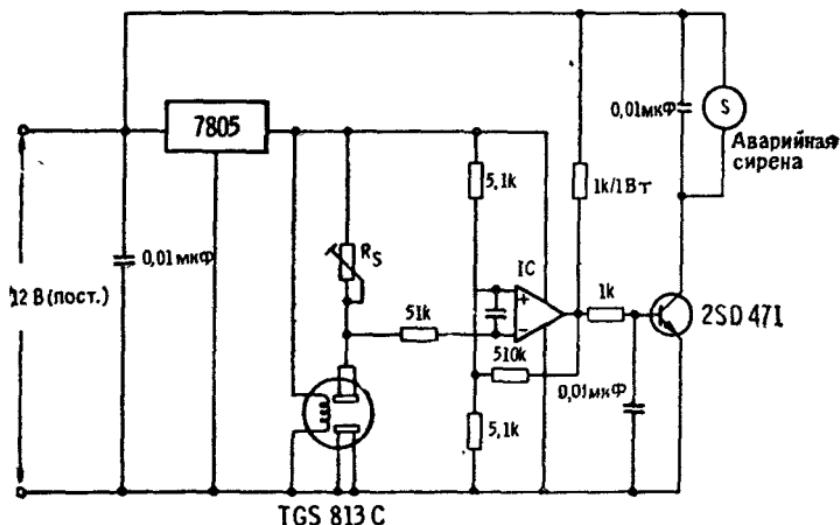


Рис. 5.4.9. Измерительная схема детектора природного газа (взрывозащита). IC — компаратор на интегральной схеме (например, M51204L).

паров алкоголя, так как в принципе эти датчики реагируют на все горючие (окисляющиеся) газы. С помощью соответствующей схемы такого рода датчик можно использовать, например, для обнаружения содержания алкоголя в крови. Его принцип работы довольно прост. После употребления алкоголя определенная часть его, содержащаяся в крови, обнаруживается также и в выдыхаемом воздухе. Чем выше содержание алкоголя в крови, тем больше доля его паров в выдыхаемом воздухе. Если датчик TGS обдувается воздухом с некоторым содержанием алкоголя, то в соответствии с концентрацией последнего в воздухе изменится сопротивление датчика.

Таблица 5.4.3

Тип датчика	Технические характеристики	Материал корпуса	Чувствительность к химическим соединениям		Применение
			Высокая	Низкая	
TGS 813	$V_C = 24$ В (макс.) $V_H = 5,0$ В $R_L = 4$ кОм	Найлон 66, максим. температура 240 °C	Пропан, бутан, метан	Спирт, оксид углерода	Детекторы газа
TGS 812	$V_C = 24$ В (макс.) $V_H = 5,0$ В $R_L = 4$ кОм	То же	Ядовитые газы (оксид углерода, аммиак, диок- сид серы и др.) и орга- нические пары (спирты, бензин и т. д.)	Метан	Сигнализаторы дыма и де- текторы алкоголя
TGS 109	$V_C = 100$ В $V_H = 1,0$ В $R_L = 4$ кОм	Полиэтилен- терефталат, максим. температура 240 °C	Пропан, бутан, метан	Спирт	Детекторы газа. Выходной сигнал позволяет изгото- влять высококачественные и дешевые детекторы, по- скольку отпадает необходи- мость в усилителе

TGS 711	$V_C = 24$ В (макс.) $V_H = 5$ В $R_L = 4$ кОм	—	Незначительные концен- трации оксида углерода	—	Возможный диапазон изме- рений от $5 \cdot 10^{-3}\%$ до $5 \cdot 10^{-2}\%$ CO
TGS 814	$V_C = 24$ В (макс.) $V_H = 5$ В $R_L = 4$ кОм	—	Незначительные концен- трации аммиака	Водород	Возможный диапазон изме- рений от $3 \cdot 10^{-3}\%$ до $1 \cdot 10^{-2}\%$
TGS 911	$V_C = 24$ В (макс.) $V_H = 1,2$ В $R_L = 4$ кОм	—	Метан, пропан, бутан и т. д.	—	Низкое напряжение накала от батареи. Хорошая вос- производимость для точных измерений. Применяется в измерительных приборах, в том числе и в коррозионной атмосфере. Возможен ана- лиз выхлопных газов

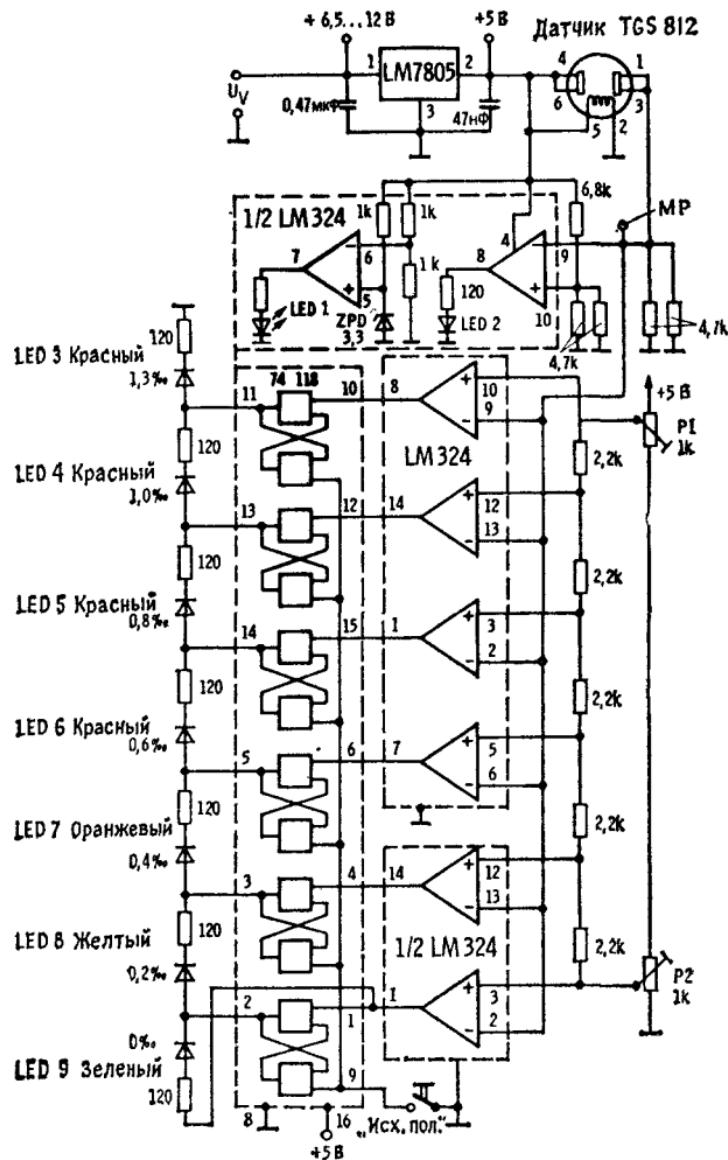


Рис. 5.4.10. Измерительная схема детектора следов алкоголя: MP — точка подключения измерительного прибора; ZPD — диод Зенера; LED — светоизлучающий диод.

Это изменение сопротивления можно определить затем с помощью измерительной схемы. Посредством

соответствующей калибровки можно измерить также содержание алкоголя в крови и тем самым оценить возможность допуска к управлению автомобилем. Такая измерительная схема показана на рис. 5.4.10. Она состоит из питаемого постоянным напряжением (LM7805) измерительного моста. В качестве активного элемента установлен газовый датчик TGS 812. Собственно измерительное напряжение подается к указанной на рис. 5.4.10 точке *MP*. В зависимости от концентрации алкоголя оно изменяется в диапазоне 0,4...5 В. Выходное напряжение подается на инвертирующие входы шести операционных усилителей, включенных как компараторы.

Резисторы $R_8 \dots R_{12}$ составляют делитель опорных напряжений. Верхнее значение этих напряжений устанавливается потенциометром P_1 , а нижнее — потенциометром P_2 . При включении питания светоизлучающего диода *LED 1* («Готов») и нажатии клавиши «Исх. пол.» («Исходное положение») запоминающие триггеры устанавливаются на 1. В этом случае светится *LED 2* (0%). Если же на датчик попадают пары алкоголя, то измерительное напряжение (в точке *MP* рис. 5.4.10) постепенно возрастает. Вследствие этого последовательно срабатывают отдельные компараторы, переключаются соответствующие триггеры и начинают светиться подключенные к ним светодиоды. Если пары алкоголя перестают воздействовать на датчик, то измерительное напряжение снова медленно спадает. Однако самый верхний СИД (соответствующий наивысшей концентрации алкоголя) продолжает светиться, так как все переключившиеся триггеры сохраняют свое состояние. Лишь после нажатия клавиши «Исх. пол.» снова устанавливается первоначальное состояние. Перед повторным замером следует выждать несколько минут, чтобы датчик мог немножко «отдохнуть».

Калибровка

Перед калибровкой газовый датчик в течение нескольких дней следует подвергнуть старению для получения надежных результатов измерений.

Лучше всего проводить калибровку с использованием водки крепостью 40 %. Для этого в восемь рюмок наливают точно по 20 мл. Затем одну из этих рюмок выпивают и выжидают примерно 1/4 ч, чтобы алкоголь мог перейти в кровь и в полости рта не оставалось бы следов алкоголя. После этого нужно подуть на датчик и убедиться, что показания все еще составляют 0 %, как и должно быть. В противном случае следует осуществить регулировку настроенным потенциометром P_2 . После второй рюмки также следует сделать паузу 1/4 ч. Показания должны составлять 0,2 %. Эта процедура продолжается далее, пока после восьмой дозы показания не достигнут 1,0 %. Конечное значение можно установить потенциометром P_1 . Калибровка рассчитана на вес тела 75 кг и на проведение процедуры натощак. Жирная пища и больший вес соответственно снижают показания.

Разумеется, не следует садиться за руль после выполнения описанной процедуры и ее нужно прервать, если вы не выносите алкоголя.

ГЛАВА 6

ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ

Измерение содержания влаги в окружающем воздухе представляет интерес во многих областях, так как влажность воздуха оказывает влияние на самочувствие людей. Слишком сухой воздух вызывает, например, увеличение числа простудных заболеваний, прежде всего органов дыхания, в то время как при повышенной влажности из-за усиленного потоотделения возникает чувство дискомфорта. В связи с этим в кондиционируемых помещениях важно поддерживать оптимальную влажность воздуха. При этом ее значения в каждый текущий момент определяются датчиками влажности (гигрометрами), подробно описанными в данной главе.

6.1. Основные определения

При описании влажности воздуха, как известно, следует различать следующие понятия.

Абсолютная влажность F_{abs} показывает, какое количество воды содержится в 1 м³ воздуха:

$$F_{abs} = \text{масса воды/объем воздуха [г/м}^3\text{].}$$

Влажность насыщения F_{sat} характеризует максимальное количество воды, которое может содержаться в 1 м³ воздуха при определенной температуре и атмосферном давлении без образования конденсата:

$$F_{sat}(T) = \text{максимальное количество воды/объем воздуха [г/м}^3\text{].}$$

Зависимость влажности насыщения от температуры (T) представлена на рис. 6.1.1.

Относительная влажность F_{rel} представляет собой выраженное в процентах отношение абсолютной влажности к влажности насыщения. По этой причине относительная влажность также зависит от температуры, как это видно на рис. 6.1.2:

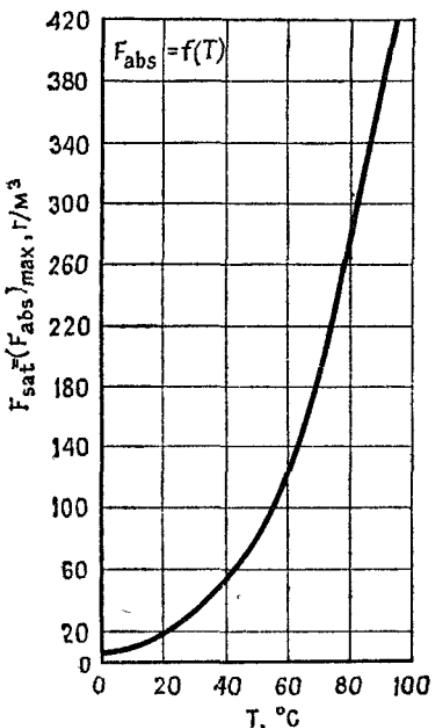


Рис. 6.1.1. Зависимость влажности насыщения F_{sat} от температуры.

$$F_{rel}(T) =$$

$$= \frac{F_{abs}}{F_{sat}(T)} \cdot 100 \%$$

6.2. Конденсационный гигрометр на основе хлорида лития

Как видно из рис. 6.2.1, принцип измерения конденсационного гигрометра на основе хлорида лития (LiCl) довольно прост. В данном случае используются два свойства гидрата хлорида лития. Во-первых, он является гигроскопичным веществом, а потому поглощает молекулы воды и, во-вторых, возникающий при

этом водный раствор LiCl представляет собой электролит, способный проводить электрический ток. Когда LiCl , помещенный в датчике (рис. 6.2.1) в капсуле из стеклоткани (2), поглощает содержащиеся в атмосфере водяные пары, проводимость между витками спирали (3) увеличивается. В результате этого между ними возникает ток, ведущий к нагреву всего датчика, и в итоге устанавливается равновесное состояние между фазой водяного пара и жидкой фазой. Температура, устанавливающаяся автоматически в этом равновесном состоянии, становится мерой

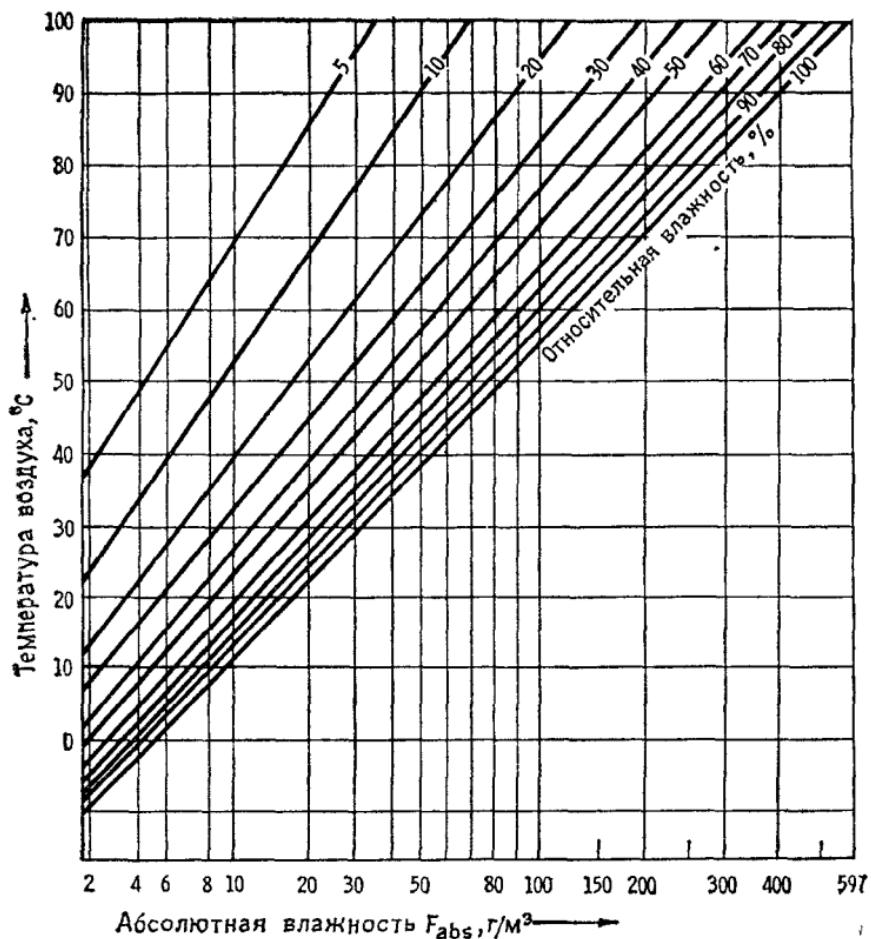


Рис. 6.1.2. Семейство характеристик абсолютной и относительной влажности воздуха при различных температурах.

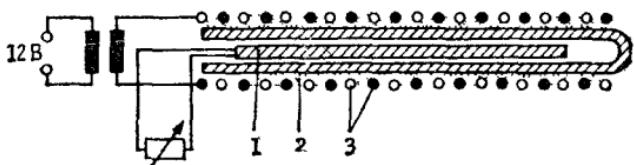


Рис. 6.2.1. Конструкция датчика влажности на основе LiCl; 1 — платиновый измерительный резистор (например, типа Pt-100); 2 — стеклоткань с LiCl; 3 — электродная спираль.

концентрации водяных паров в окружающем воздухе. В свою очередь температура измеряется датчиком типа Pt-100, являющимся конструктивным элементом датчика влажности. Поскольку эта температура пере-

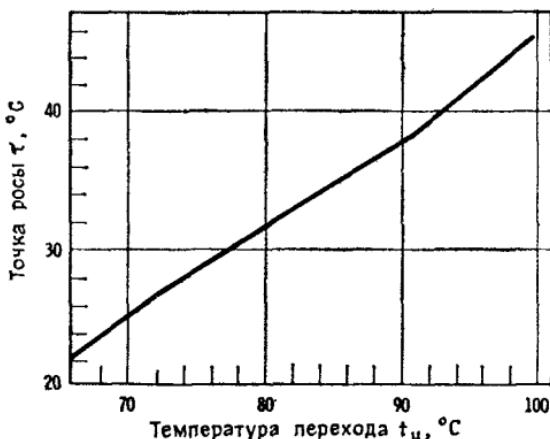


Рис. 6.2.2. Зависимость температуры переходного состояния t_u от точки росы t для датчика влажности на основе LiCl.

ходного состояния (температура перехода) почти линейно связана с температурой точки росы (рис. 6.2.2), она служит прямой мерой содержания влаги в воздухе.

6.3. Емкостные датчики влажности

Недорогими и прежде всего простыми в обращении являются датчики влажности емкостного типа. Они состоят из специальной пленки с напыленным с двух сторон слоем золота (рис. 6.3.1). Таким образом, пленка служит диэлектриком плоского конденсатора. С помощью соответствующей измерительной схемы, более подробно на которой остановимся ниже, это изменение емкости можно преобразовать в постоянное напряжение. Общее устройство такого датчика (фирма Valvo) показано на рис. 6.3.2, а в табл. 6.3.1 приведены его характеристики.

Зависимость емкости датчика от влажности воздуха (F_{rel}) приведена на рис. 6.3.3. Поскольку эта

Соединительные провода

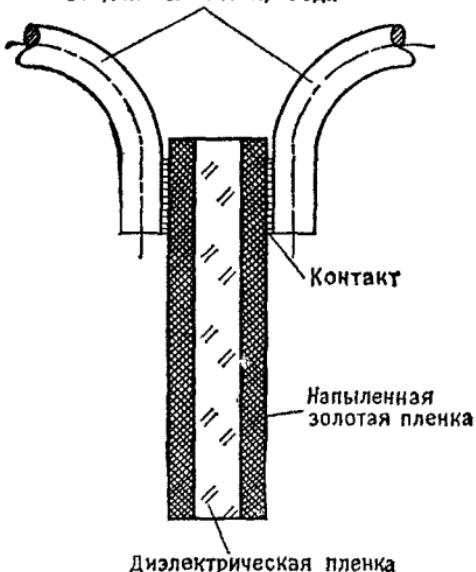


Рис. 6.3.1. Принципиальное устройство диэлектрического датчика влажности.

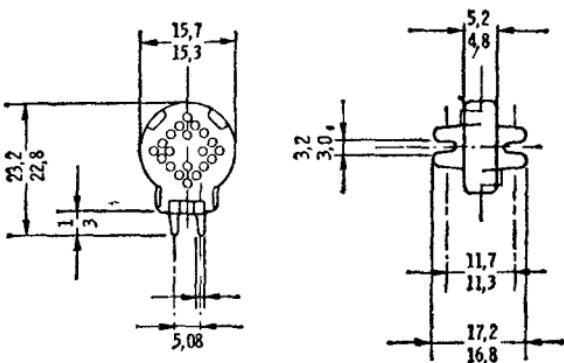


Рис. 6.3.2. Конструкция промышленного датчика влажности фирмы Valvo.

характеристика изогнута (нелинейна), непосредственную индикацию можно осуществить только при соответствующим образом откалиброванной шкале или

Таблица 6.3.1

Технические характеристики датчика влажности фирмы Valvo

Емкость ($\theta = 25^\circ\text{C}$, $F_{rel} = 43\%$, $f = 100 \text{ кГц}$), пФ	122 ($\pm 15\%$)
Чувствительность ($F_{rel} = 43\%$), пФ/%	$0,4 \pm 0,05$
Температурная зависимость ($f = 1 \text{ кГц}...1 \text{ МГц}$), % · К $^{-1}$	0,1
Диапазон измерительной частоты, кГц	1 ... 1000
Диапазон измеряемой влажности, %	10 ... 90
Диапазон температуры хранения, °C	-25 ... +80
Диапазон влажности при хранении, %	0 ... 100
Диапазон рабочих температур, °C	0 ... 60
Максимальное рабочее напряжение (постоянное и переменное), В	15
Тангенс угла потерь при $\theta_U = 25^\circ\text{C}$ и $f = 100 \text{ кГц}$	$< 35 \cdot 10^{-3}$
Время срабатывания (90 %-ное значение) при $\theta_U = 25^\circ\text{C}$ в потоке воздуха, мин:	
а) в диапазоне $F_{rel} = 10 \dots 43\%$	< 3
б) в диапазоне $F_{rel} = 43 \dots 90\%$	< 5
Гистерезис при цикле *	
$F_{rel} = 10\% \text{ (67)} \quad 90\% \text{ (67)} \quad 10\%$	$\approx 3\%$
Режим пайки: максим. температура 240°C , максим. длительность 2 с	

* При обозначении длительности выдержки на каждой ступени цикла (67) автором не указана размерность. — Прим. перев.

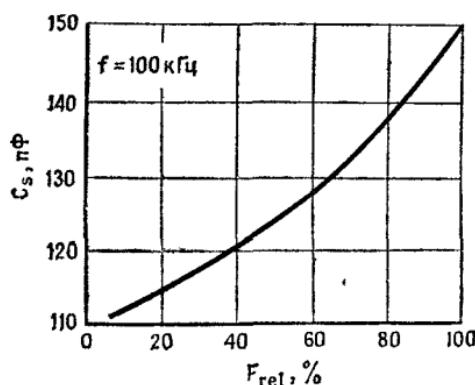


Рис. 6.3.3. Зависимость емкости датчика C_s от относительной влажности F_{rel} .

с помощью дополнительно включенной схемы линеаризации.

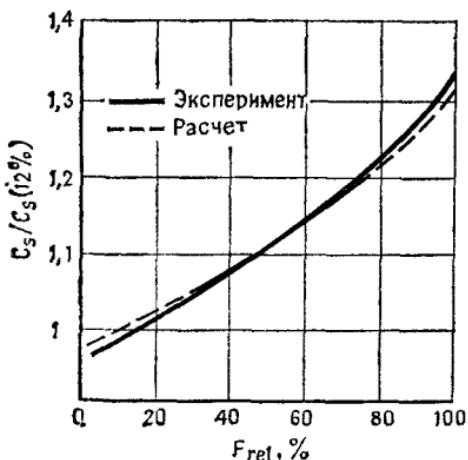


Рис. 6.3.4. Зависимость между относительной влажностью воздуха и емкостью датчика, нормированной при $F_{rel} = 12\%$.

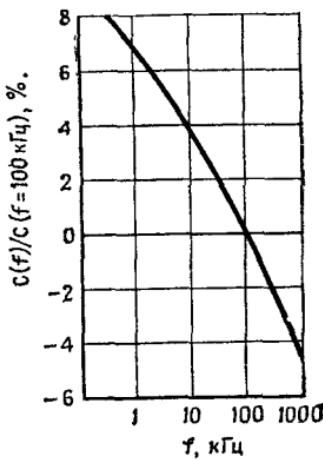


Рис. 6.3.5. Частотная характеристика датчика влажности.

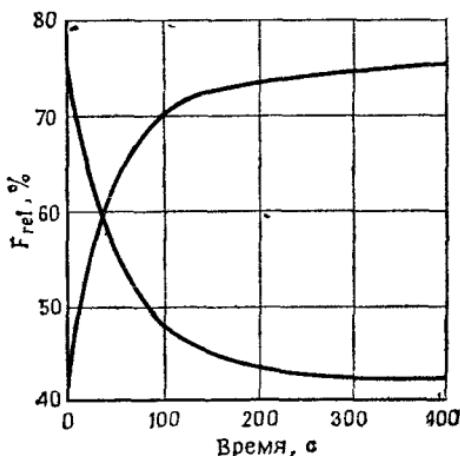


Рис. 6.3.6. Время срабатывания датчика влажности при резко изменяющемся содержании влаги в воздухе.

На рис. 6.3.4 показана зависимость между относительной влажностью F_{rel} и емкостью датчика, нормированной при $F_{rel} = 12\%$.

Общая емкость датчика равна

$$C_s = C_0 + \Delta C,$$

где C_0 — емкость при нулевой влажности, ΔC — изменение емкости из-за наличия влаги. Емкость датчика C_s слабо зависит от измерительной частоты, как видно из рис. 6.3.5. Поэтому незначительное изменение измерительной частоты не оказывает влияния на показания датчика.

Важной характеристикой, определяющей применимость датчика, является его время срабатывания или постоянная времени. При резком изменении влажности датчику требуется около 2 мин для достижения 90 % окончательного показания (рис. 6.3.6), соответствующего вновь установившейся влажности.

6.4. Измерительные схемы

Изменения емкости можно, естественно, как и изменения сопротивления, измерять с помощью измерительного моста. Соответствующая схема показана на рис. 6.4.1. Она состоит из моста для измерения ем-

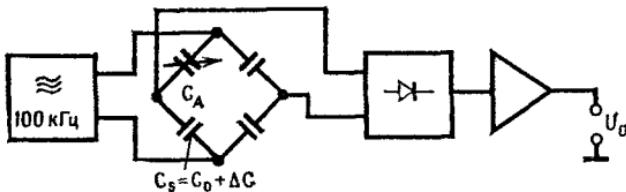


Рис. 6.4.1. Измерительная схема датчика влажности с емкостным мостом.

кости с датчиком влажности в качестве активного элемента. Мост питается переменным напряжением с частотой около 100 кГц. С помощью подстроекного конденсатора C_A выходное напряжение U_o устанавливается на нуль при $\Delta C = 0$. При изменении емкости ΔC выходное напряжение U_o служит мерой этого изменения и соответственно изменения влажности.

Для простых конструкций датчиков получили распространение также схемы, работающие по разности импульсов. Принципиальное построение такой схемы

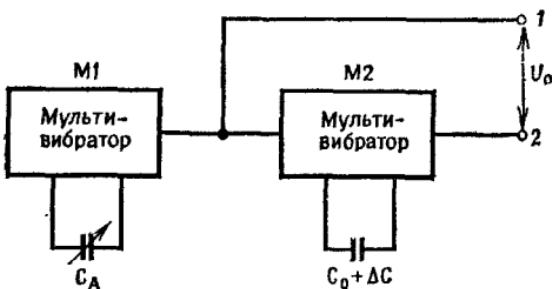


Рис. 6.4.2. Принципиальное устройство схемы с двумя мультивибраторами, работающей по разности импульсов.

показано на рис. 6.4.2. Она состоит из двух мультивибраторов (M_1 и M_2), причем M_1 синхронизирует M_2 .

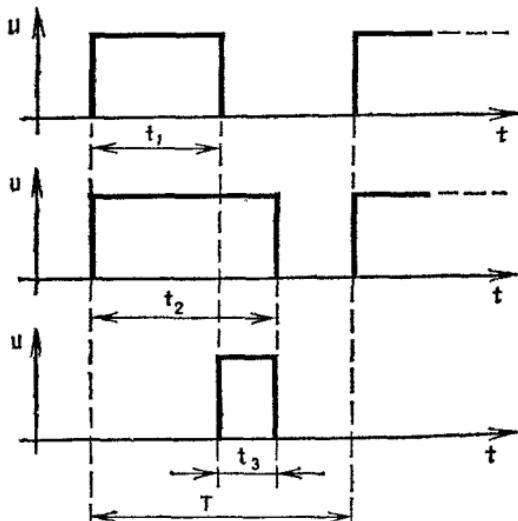


Рис. 6.4.3. Формирование разностного импульса схемой, показанной на рис. 6.4.2.

При $\Delta C = 0$ длительность импульсов обоих мультивибраторов одинакова ($t_1 = t_2$). Если же емкость датчика изменится ($\Delta C \neq 0$), то между двумя выходами 1 и 2 возникнет «разностный» импульс длитель-

ностью $t_3 = t_2 - t_1 \sim \Delta C$. Если период прямоугольного импульса напряжения равен $T = 2t_1$, а амплитуда импульсов равна U_B , то для среднего арифметического значения выходного напряжения U_o получается уравнение

$$U_o = \frac{t_3}{T} U_B = \frac{\Delta C}{2C_0} U_B.$$

При условии, что мультивибраторы M_1 и M_2 в сущности одинаковы (например, мультивибраторы

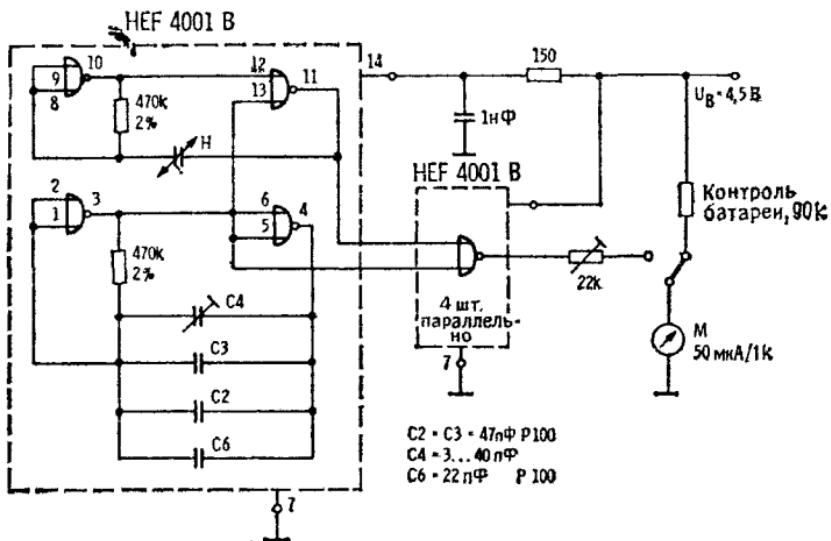


Рис. 6.4.4. Полная измерительная схема, работающая по разности импульсов: H — датчик влажности.

типа HEF 4001В, выполненные на одном кристалле по технологии LOCOS), а емкость датчика имеет такой же температурный коэффициент, как и подстроечный конденсатор C_A , отношение t_3/T не зависит от изменений температуры.

Разумеется, напряжение питания должно быть стабилизировано, так как оно непосредственно входит в результат измерений (U_o).

На рис. 6.4.4 изображена простая измерительная схема без стабилизации напряжения и без линеаризации. Поскольку ток этой схемы чрезвычайно мал

(около 100 мкА), три элемента типа «миньон» могут обеспечить питание примерно в течение года.

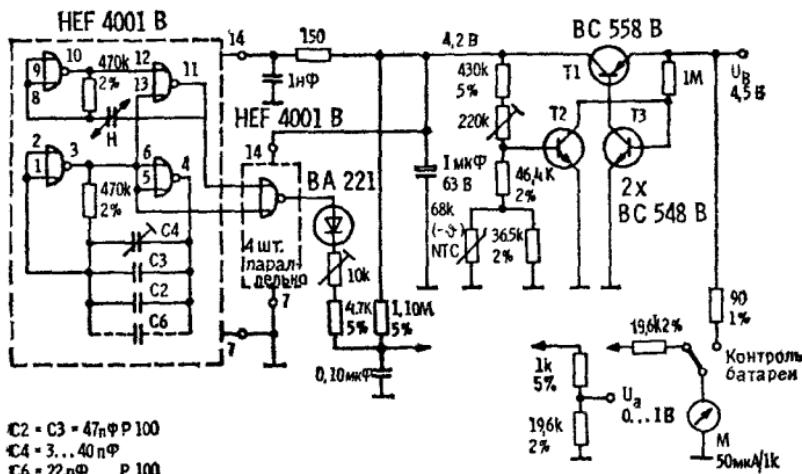


Рис. 6.4.5. Улучшенная схема со стабилизированным питанием и линеаризацией: H — датчик влажности; NTC — терморезистор с отрицательным ТКС. На измерительном приборе M при токе 45 мкА имеется метка, соответствующая нижнему пределу напряжения $\approx 4,1$ В.

Улучшенная схема приведена на рис. 6.4.5. Напряжение питания стабилизируется транзисторами (BC 558В, 2 × BC 548В), а выходное напряжение линеаризовано. Линеаризация (рис. 6.4.6) осуществляется следующим образом. Выходные импульсы заряжают конденсатор C через D и R_1 и одновременно ток разряда, пропорциональный напряжению на конденсаторе, протекает через R_2 . В результате этого больше не соблюдается пропорциональность между выходным напряжением U_O и средним значением напряжения выходного импульса $U_{O(AV)}$. Соответствую-

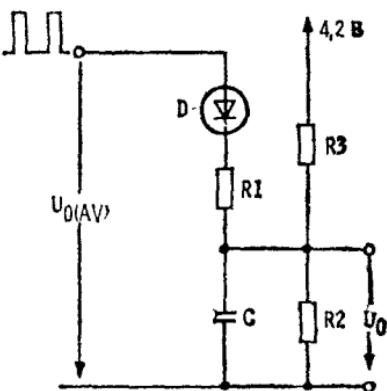


Рис. 6.4.6. Схема линеаризации выходного сигнала датчика.

щим подбором C , R_1 и R_2 можно достигнуть линеаризации выходного напряжения.

6.5. Калибровка

Для однозначного отождествления измеренного напряжения с определенной влажностью необходимо создание в воздухе заранее известной влажности (табл. 6.5.1).

Т а б л и ц а 6.5.1

Относительная влажность (%) воздуха над насыщенными растворами некоторых солей при различных температурах

Соль	Температура, °C									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Сульфат калия K_2SO_4	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96
Нитрат калия KNO_3	96	95	94	93	92	91	89	88	85	82
Хлорид калия KCl	88	88	87	86	85	85	84	82	81	80
Сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$	82	82	81	81	80	80	80	79	79	78
Хлорид натрия $NaCl$	76	76	76	76	75	75	75	75	75	75
Нитрит натрия $NaNO_2$	—	—	—	65	65	63	62	62	59	59
Нитрат аммония NH_4NO_3	—	73	69	65	62	59	55	53	47	42
Бихромат натрия $Na_2Cr_2O_7$	59	58	56	55	54	52	51	50	47	—
Нитрат магния $Mg(NO_3)_2$	58	57	56	55	53	52	50	49	46	—
Карбонат калия K_2CO_3	—	47	44	44	43	43	43	42	—	—
Хлорид магния $MgCl_2$	34	34	34	33	33	33	32	32	31	30
Ацетат калия CH_3COOK	—	21	21	22	22	22	21	20	—	—
Хлорид лития $LiCl$	14	14	13	12	12	12	12	11	11	11

Насыщенные растворы отдельных солей вызывают уменьшение влажности в замкнутом воздушном пространстве над ними. Этот эффект можно использовать для калибровки датчиков влажности. Для этого калибруемый датчик монтируют в герметичном сосуде (например, в стеклянной банке для консервирования), как показано на рис. 6.5.1, и соединяют с электронной схемой. Затем в сосуд помещают пропитанный насыщенным раствором ватный тампон и сразу же закрывают крышкой. Спустя примерно

30 мин в резервуаре устанавливается соответствующая относительная влажность, указанная в табл. 6.5.1. Например, в случае применения LiCl при комнатной температуре (20°C) получается относительная влаж-

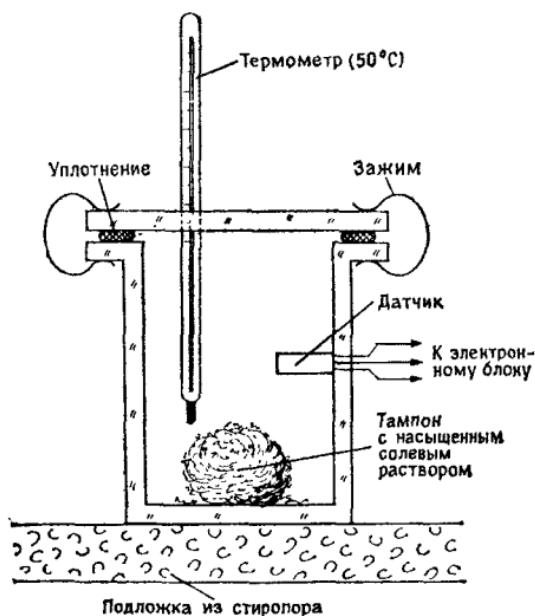


Рис. 6.5.1. Устройство для калибровки датчиков влажности.

ность 12 %. Используя различные солевые растворы (при их смене сосуд обязательно очищают), можно промерить всю характеристику датчика для относительной влажности от 12 до 98 %, а в случае необходимости также и линеаризовать ее.

ГЛАВА 7

ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Среди датчиков магнитного поля различают датчики трех типов, использующие различные физические эффекты, а именно:

магниторезистивные датчики.

датчики Холла и

датчики Виганда.

В общем случае датчики магнитного поля отличаются простотой устройства и связанной с этим надежностью. Благодаря таким свойствам они особенно пригодны для применения в автомобилях и в бытовой технике. Важными и интересными применениями магнитных датчиков являются, например, измерения положения, скорости вращения, давления и линейной скорости.

7.1. Магниторезистивные датчики

Некоторые ферромагнитные материалы, например пермаллоем (80 % Ni и 20 % Fe), изменяют свое электрическое сопротивление при воздействии магнитного поля. Степень этого изменения зависит от величины напряженности магнитного поля и угла между вектором напряженности и направлением тока. С помощью современной тонкопленочной технологии можно изготовить небольшие и очень дешевые магниторезистивные датчики.

Они состоят из резистивного элемента в форме меандра (рис. 7.1.1) сопротивлением от 30 Ом до 1 кОм. Поскольку получать сигнал с помощью таких датчиков наиболее целесообразно в мостовой схеме,

в датчике располагают две меандровые структуры (*A/B*) различной ориентации.

На рис. 7.1.1,*б* продемонстрирована возможность применения такого датчика для измерения скорости

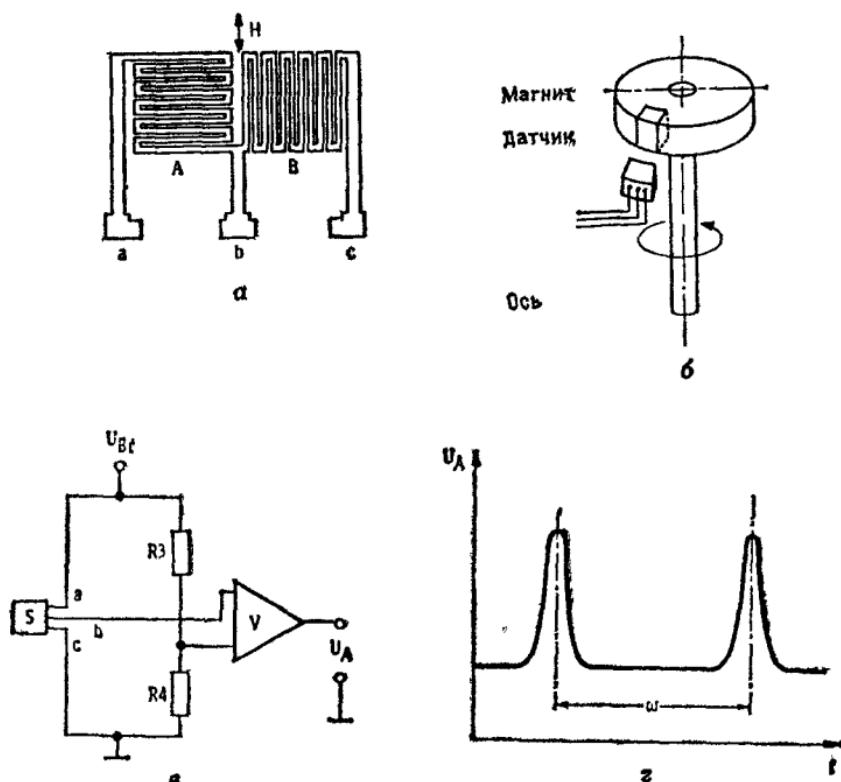


Рис. 7.1.1. Чувствительный элемент магниторезистивного датчика (*а*); устройство для измерения скорости вращения или числа оборотов датчиком с магниторезистивным элементом (*б*), измерительная схема (*в*) и форма сигнала на выходе (*г*).

вращения. Магнит, установленный на оси вращения, при каждом обороте проходит один раз мимо магниторезистивного датчика, вызывая изменение его сопротивления. Это изменение сопротивления с помощью схемы, показанной на рис. 7.1.1, *в*, преобразуется в изменение напряжения U_A (см. рис. 7.1.1, *г*).

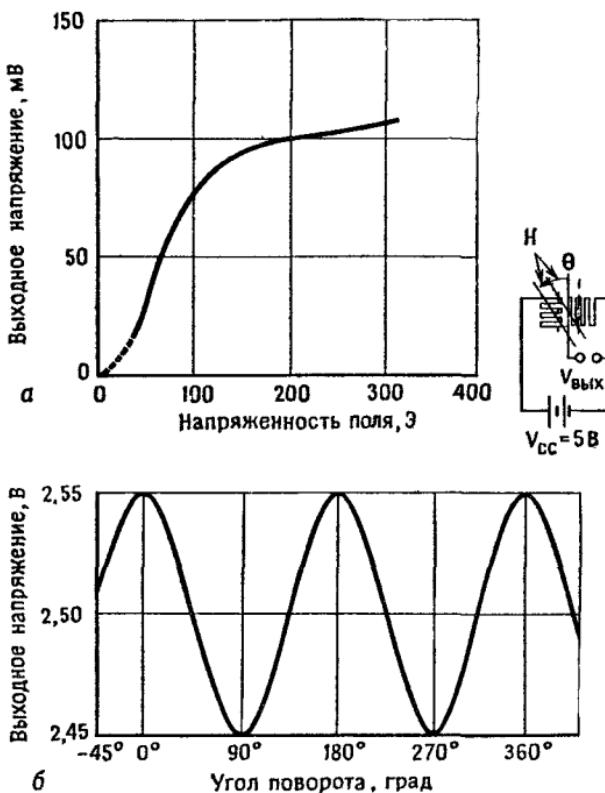


Рис. 7.1.2. Зависимость выходного напряжения сигнала от напряженности магнитного поля (а) и от угла поворота (б).

Зависимость выходного напряжения сигнала от напряженности поля или угла поворота показана на рис. 7.1.2.

7.2. Датчики Холла

Датчики магнитного поля, использующие эффект Холла, относятся к активным датчикам, так как они сами вырабатывают измерительное напряжение, связанное с магнитным полем. На рис. 7.2.1 схематически показаны устройство и принцип действия датчика Холла.

Под действием тока I и магнитной индукции B , векторы которых взаимно перпендикулярны, на об-

кладках датчика возникает измерительное напряжение U_H . Величина этого напряжения зависит от геометрии (длины l и толщины d) датчика, тока I , коэф-

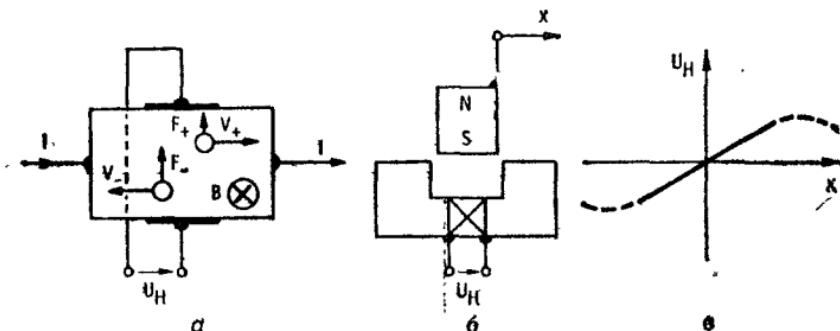


Рис. 7.2.1. Принцип действия холловского чувствительного элемента (а), устройство датчика перемещения с холловским чувствительным элементом (б) и изменение сигнала в зависимости от перемещения (в).

фициента Холла R_H и магнитной индукции B :

$$U_H = \frac{R_H I B}{d}.$$

Материалом для изготовления датчика Холла чаще всего служат кремний, арсенид индия (InAs) и

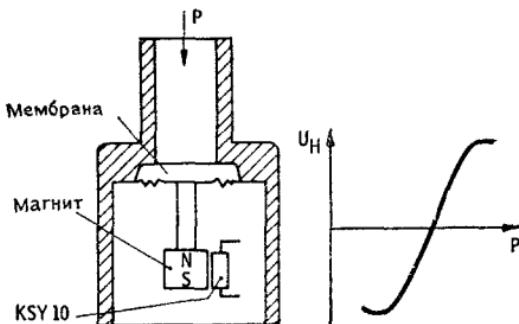


Рис. 7.2.2. Датчик давления, действие которого основано на смещении постоянного магнита относительно холловского датчика.

антимонид индия (InSb). Датчик Холла из арсенида индия, например, при магнитной индукции $B = 1$ Т и токе 0,1 А имеет выходное напряжение около 0,5 В.

При смещении постоянного магнита по отношению к датчику Холла (рис. 7.2.1, б) напряжение датчика изменится пропорционально перемещению X . Следовательно, датчики Холла можно также использовать как датчики перемещения или положения.

Такой датчик перемещения в соответствующем устройстве (рис. 7.2.2) можно использовать также для измерения давления. В этом устройстве постоянный магнит расположен на мемbrane, прогибающейся под действием изменяющегося давления. В результате магнит смещается относительно датчика, что ведет к изменению напряжения.

7.3. Датчики Виганда

Новейшей разработкой в области датчиков магнитного поля является датчик Виганда. Он состоит из предварительно обработанной механически проволоки из сплава «Викалой» (10 % V, 52 % Co, 38 % Fe) диаметром $\approx 0,3$ мм, намотанной в виде катушки длиной 15 мм, имеющей около 1300 витков. Если эту катушку поместить в магнитное поле, то при превышении определенной величины напряженности поля направление намагничивания спонтанно изменится. В результате этого изменения возникает импульс напряжения длительностью ≈ 20 мкс и амплитудой $\approx 2,5$ В.

Достоинствами датчика Виганда являются:
отсутствие необходимости в источнике питания,
большая величина сигнала (несколько вольт),
широкий температурный диапазон применения
 $(-196...+175^{\circ}\text{C})$,

конструктивная защищенность от коротких замыканий,

искробезопасность.

На рис. 7.3.1, а показано изменение во времени импульса, возникшего в магнитно-бистабильной проволоке. Амплитуда и длительность импульсов не зависит от скорости изменения магнитного поля, так что датчики указанного типа могут применяться при

скоростях, даже близких к нулю. Поэтому индуктивные методы уступают в таких случаях данному спо-

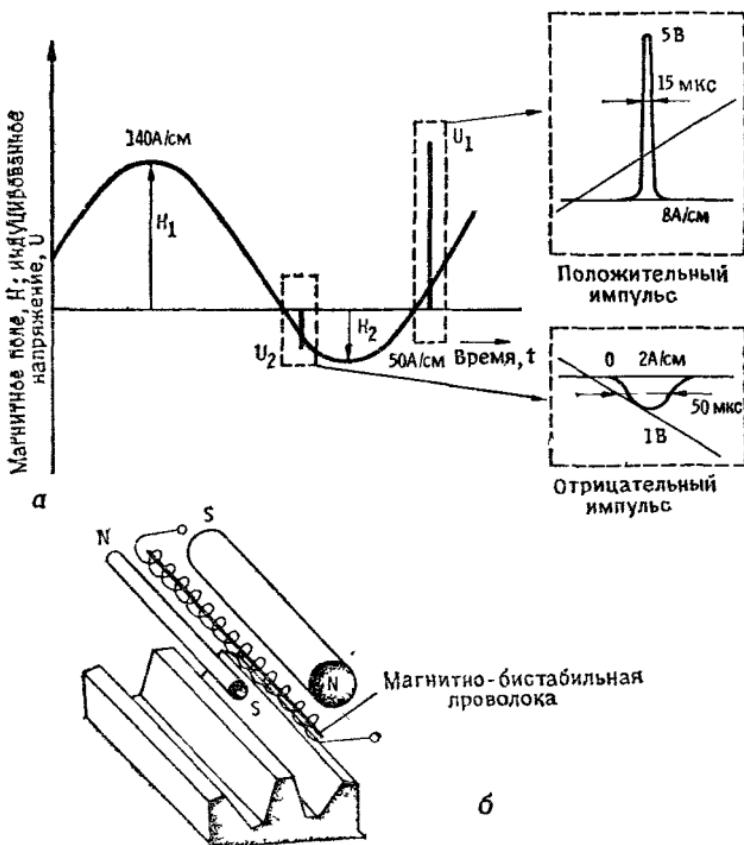


Рис. 7.3.1 Сигнал датчика положения на основе магнитно бистабильной проволоки (а) и устройство датчика (б).

собу измерения. На рис. 7.3.1, б проиллюстрировано применение такого датчика для измерения скорости вращения.

ГЛАВА 8

ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Бесконтактное измерение ряда физических величин, как, например, перемещений, вибраций, температуры и т. д., оказывается возможным лишь с помощью оптических датчиков. При этом информация передается не по кабелю, а световыми волнами, которые могут изменяться по интенсивности, фазе, цвету или геометрическому распределению в пространстве и благодаря этому оказываются пригодными для получения и передачи информации. Чрезвычайно простым оптическим датчиком является, например, известная фотоячейка.

Фотоячейка состоит из источника света (лампы накаливания или светодиода) и приемника (фотодиода или фоторезистора). Нарушение передачи света от источника к приемнику служит информацией о нахождении объекта в фотоячейке. Если число импульсов отнести к единице времени, то, например, при конвейерном производстве можно получить информацию о количестве деталей, изготовленных за 1 час или за день.

Основные принципы

Преобразование оптического сигнала в электрический осуществляется детекторами излучения, использующими различные физические эффекты. Мы опишем три типа детекторов излучения, наиболее часто применяемых в оптических датчиках, а именно фотодиоды, фоторезисторы и приемники теплового излучения (ИК-датчики).

Фотодиоды

При облучении кремниевых фотодиодов светом в них возникает напряжение, определенным образом

зависящее от силы света. Эффект, вызывающий возникновение этого напряжения, называется внутренним фотоэффеktом.

На практике чаще всего применяют *pin*-диоды. Эти диоды имеют слоистую структуру (рис. 8.0.1), в которой тонкие проводящие слои *p*- и *n*-типа разделены областью нелегированного высокоменного кремния (*i*). При попадании на *pi*-переход световых лучей

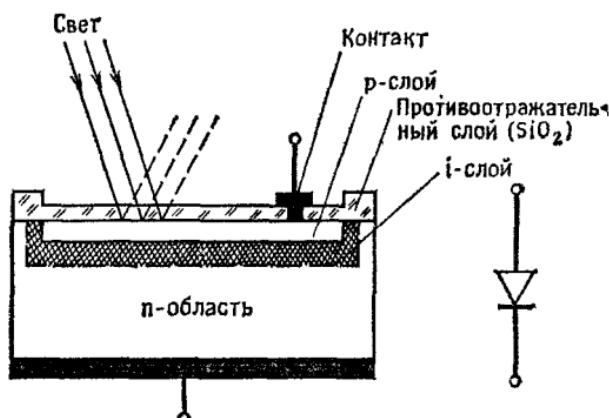
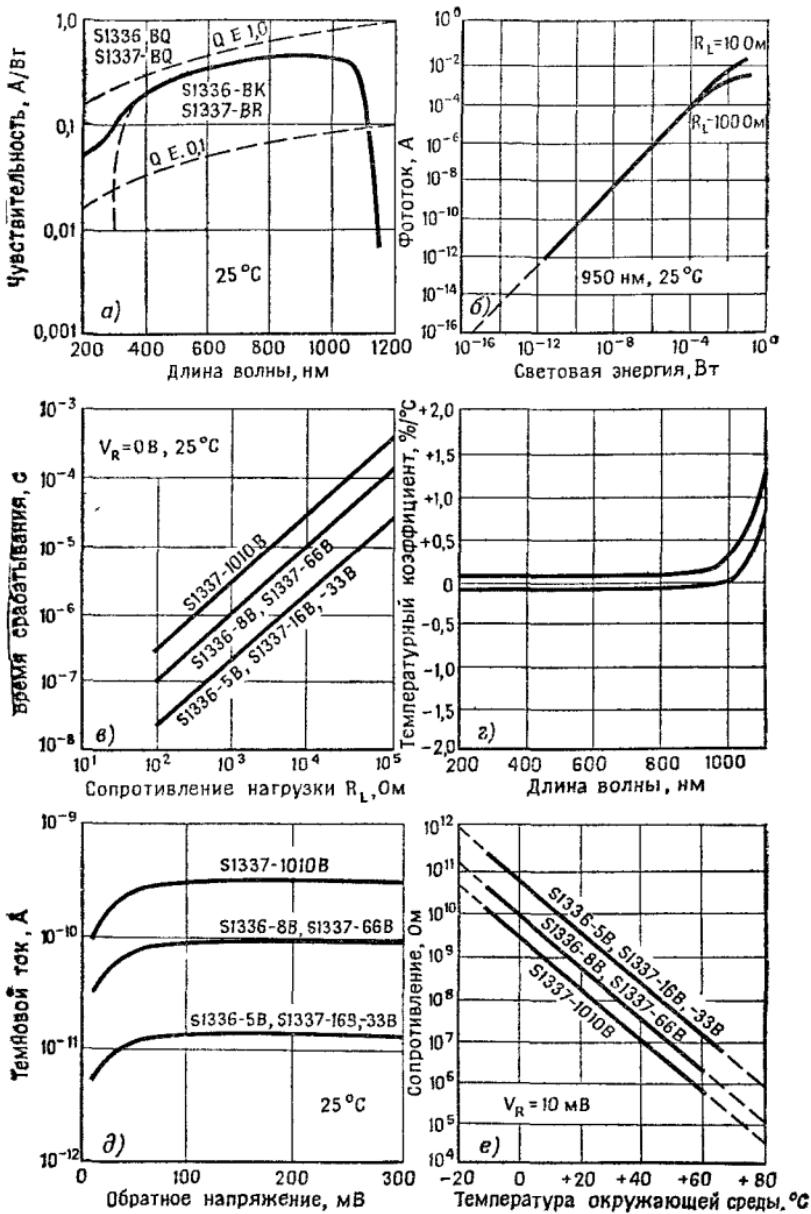


Рис. 8.0.1. Структура *pin*-диода.

чей достаточно высокой энергии ($E = h\nu$) возникает фототок I_{sh} (ток короткого замыкания) порядка 0,1...1 А/Вт. Чувствительность такого фотодиода очень сильно зависит от длины волны (цвета) используемого излучения. На рис. 8.0.2, а представлена спектральная чувствительность типичной кремниевой фотоячейки в диапазоне длин волн от 200 нм до 1,2 мкм (1200 нм).

Обозначенная здесь через *Q. E.* квантовая эффективность характеризует отношение числа фотонов, попавших на диод, к числу электронов, возникших в виде фототока I_{sh} .

Фототок I_{sh} изменяется линейно в зависимости от интенсивности падающего света при ее изменении в пределах более 6 порядков, так что возможна прямая индикация интенсивности света.

Рис. 8.0.2. Характеристики *p-i-n* диода.

Нижняя область этой характеристики ограничена шумами (шумы Джонсона, шумы темнового тока и шумы дробного эффекта).

Для определения разрешающей способности датчика основное значение имеет эквивалентная мощность шума (ЭМШ). Этот параметр определяется

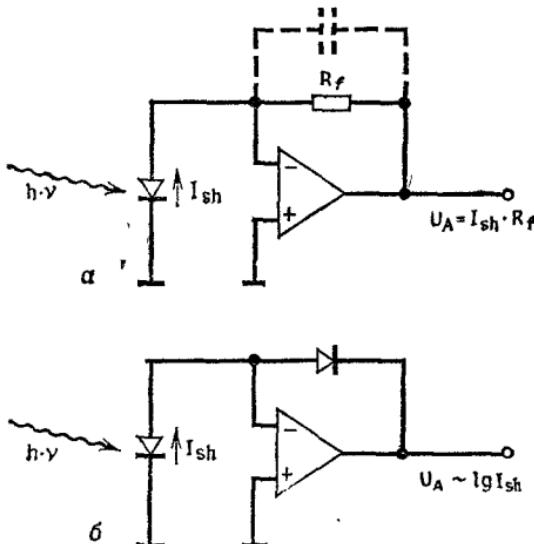


Рис. 8.0.3. Линейное (а) и логарифмическое (б) усиление по току.

как отношение шумового тока (в $\text{А}/\text{Гц}^{1/2}$) к чувствительности к световому потоку (в $\text{А}/\text{Вт}$) при отношении сигнал/шум, равном 1. Поскольку чувствительность к лучевому потоку зависит от длины волны, то это же справедливо и для параметра ЭМШ. Изготовители детекторов излучения чаще всего указывают значение ЭМШ в максимуме кривой чувствительности, причем почти всегда у обычных детекторов излучения оно составляет примерно $10^{-15} \text{ Вт}/\text{Гц}^{1/2}$.

Преобразование слабых фототоков порядка $10^{-8} \dots 10^{-5} \text{ А}$ требует тщательного выбора схем усилителей. Типичные схемы для преобразования ток — напряжение показаны на рис. 8.0.3, а и б.

Преобразование ток — напряжение с обеспечением линейности выходного напряжения осуществляется с

помощью резистора R_f в цепи обратной связи операционного усилителя. Для больших усилений слабых фототоков применяют операционные усилители на полевых транзисторах с высоким входным сопротивлением (10^{11} Ом) и высокоомные резисторы R_f .

При обработке сигналов переменного напряжения амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) схемы определяется емкостью фотоячейки и сопротивления R_f .

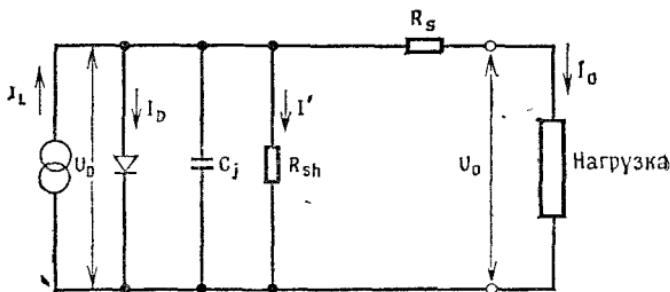


Рис. 8.0.4. Эквивалентная схема *pin*-диода.

Если в цепь обратной связи операционного усилителя включить диод, то получится логарифмически возрастающая характеристика, наиболее подходящая для больших диапазонов измерений (рис. 8.0.3, б).

Эквивалентная схема фотодиода может быть представлена в виде цепи из источника тока (I_L), диода (I_D), емкости (C_j), резистора (шунтирующего сопротивления R_{sh} с током I') и последовательно включенного резистора (R_s) (рис. 8.0.4). Отсюда выходной ток получается равным

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \cdot \exp \left[\frac{eU_D}{kT} - 1 \right] - I',$$

где I_s — ток насыщения (фотоячейки), e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Тогда выходное напряжение U_o (при $I_o = 0$) получается равным

$$U_o = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left[\frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right],$$

а выходной ток короткого замыкания (при $R_L = 0$ и $U_o = 0$)

$$I_{sh} = I_L - I_S \left[\exp e \frac{I_{sh} R_S}{kT} - 1 \right] - \frac{I_{sh} R_S}{R_{sh}}.$$

Для случая, когда сопротивление R_S очень мало (менее 10 Ом), а сопротивление R_{sh} очень велико (более 10^7 Ом), обоими последними членами выражения можно пренебречь, так что получается

$$I_{sh} \approx I_L.$$

На рис. 8.0.5 показаны некоторые выпускаемые промышленностью кремниевые *pin*-диоды.

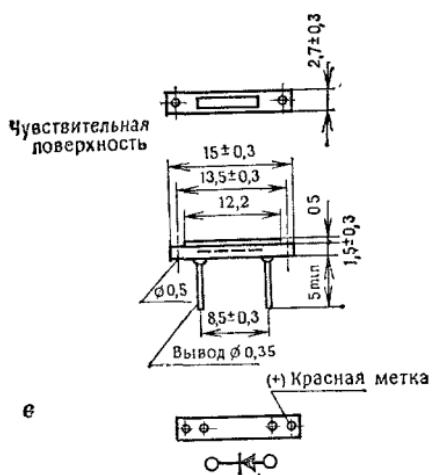
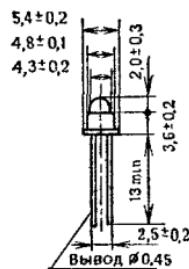
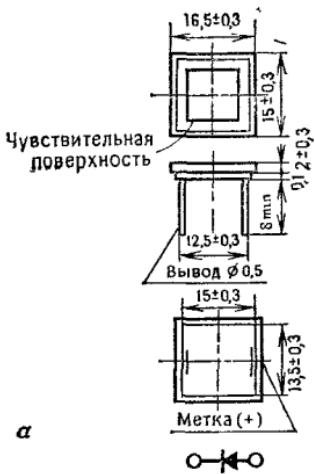
В основном они отличаются геометрическими формами. При выборе подходящего конструктивного исполнения следует учитывать, что емкость *pn*-перехода C_i возрастает при увеличении его площади и тем самым оказывает решающее влияние на АЧХ всей схемы. Однако, поскольку облученность относится ко всей поверхности ($\text{Вт}/\text{см}^2$), с помощью детекторов большей площади можно достигнуть увеличения выходного тока. Поэтому в каждом отдельном случае нужно оптимальное согласование.

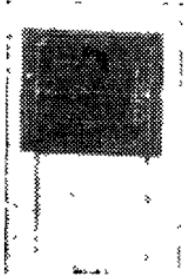
При монтаже фотоячеек (особенно для УФ-диапазона) следует обращать внимание на то, чтобы окошки детекторов перед монтажом были очищены этиловым спиртом (рис. 8.0.6).

При пайке необходимо исключать возможность перегрева фотоячейки, причем нагрев каждого спая допускается максимум до 260°C в течение 5...10 с.

Фоторезисторы

У некоторых материалов (например, CdS, CdSe, PbS, PbSe) электрическое сопротивление изменяется под действием света из-за образования электронно-дырочных пар. Возникающие при этом свободные носители заряда вызывают резкое снижение сопротивления. На рис. 8.0.7 показана зависимость сопротивления такого датчика при различной освещенности (измеренной в люксах). В зависимости от силы света





a



б



в



г

Рис. 8.0.5. Разновидности конструктивных исполнений *pin-диодов* (слева) и их внешний вид (справа).

оно изменяется от 100 до 1 кОм. Спектральная чувствительность (рис. 808) определяется выбором ма-

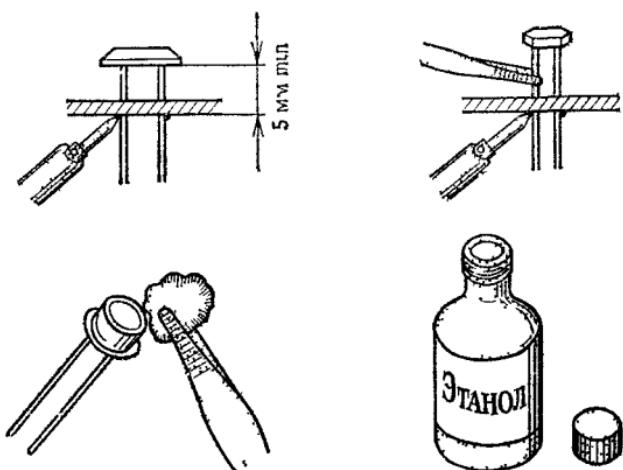


Рис. 806. Правила обращения с *pin* диодами.

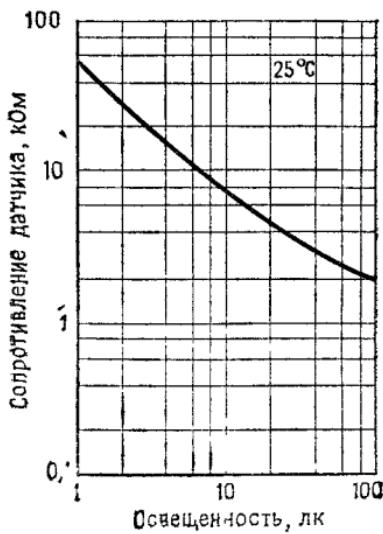


Рис. 807. Чувствительность фоторезистора.

териала. Так, CdS обладает максимальной чувствительностью в зеленой области спектра и поэтому особенно пригоден для применения в измерителях освещенности. В противоположность этому максимум

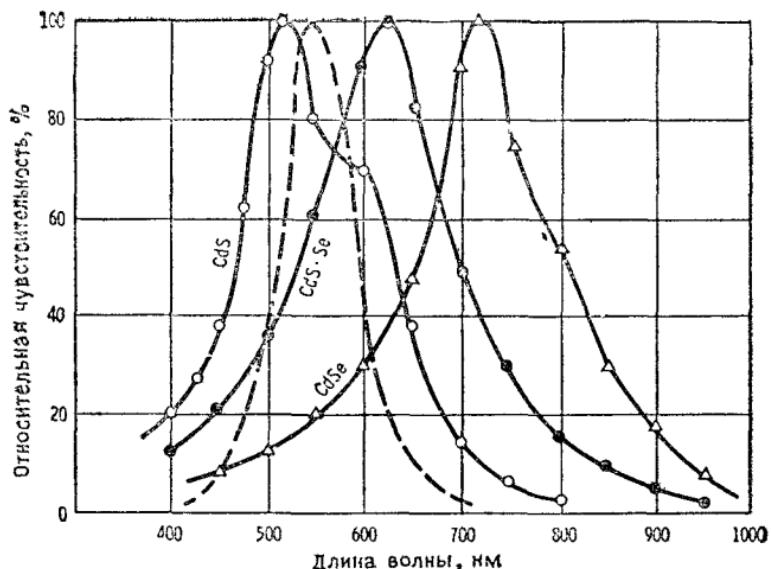


Рис. 8.0.8. Распределение спектральной чувствительности различных фотодиодов.

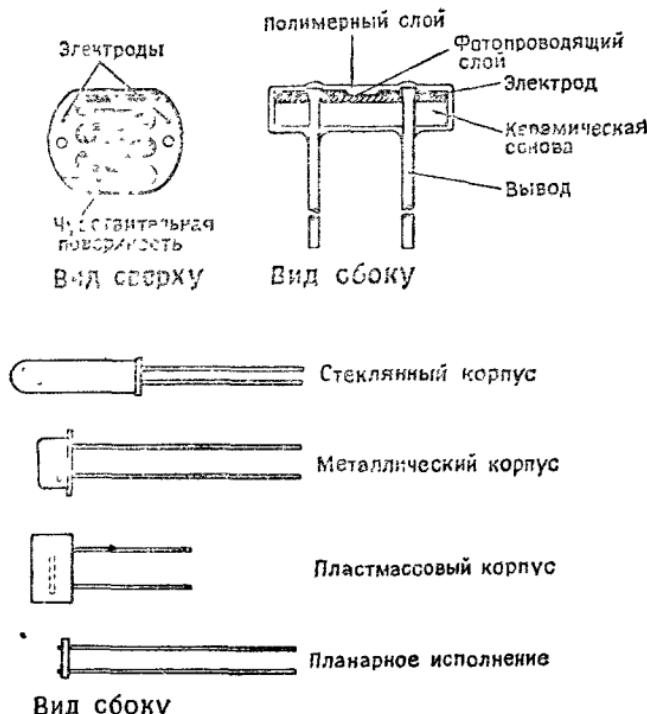


Рис. 8.0.9. Конструктивные исполнения фотодиодов.

спектральной чувствительности CdSe находится в красной области, а у фоторезисторов из PbS/PbSe — даже в ИК-области.

Конструкция промышленного фоторезистора показана на рис. 8.0.9. Он состоит из тонкой пленки

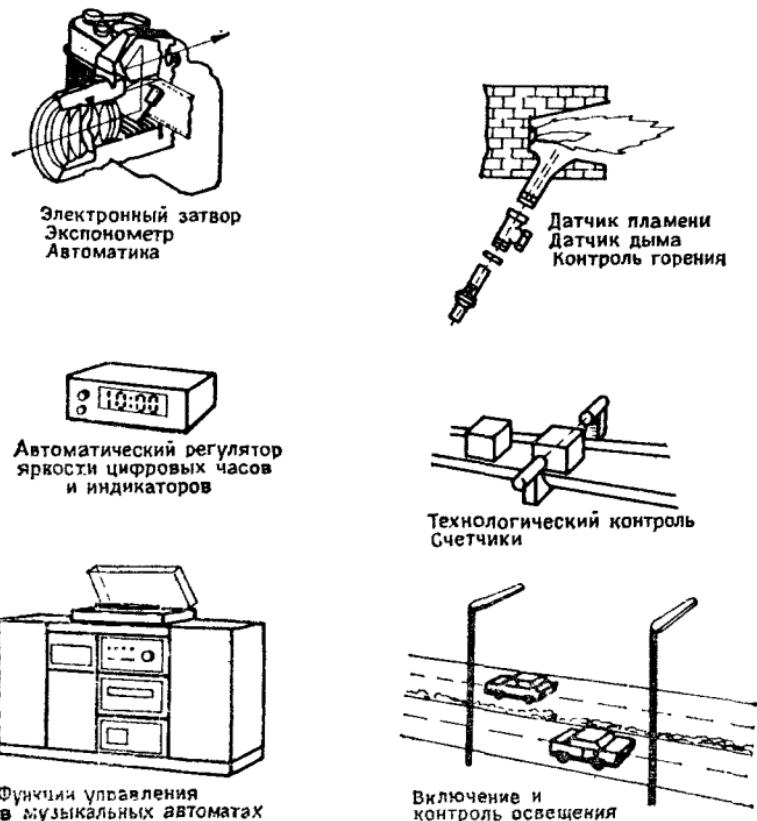


Рис. 8.0.10. Примеры применения фоторезисторов.

светочувствительного материала (CdSe/CdS) в форме меандра. Этот фотопроводящий слой, расположенный на керамической основе с соединительными проводами, для защиты от влаги и грязи покрыт слоем прозрачного полимера. На рис. 8.0.9 показаны также наиболее распространенные конструктивные формы, обеспечивающие разнообразие возможностей применения фоторезисторов. Некоторые области примене-

ния датчиков на основе фоторезисторов проиллюстрированы на рис. 8.0.10.

Тепловые приемники излучения

Тепловыми приемниками излучения называют детекторы, в которых под действием облучения светом происходит нагрев, вызывающий возникновение в них вторичных процессов (изменение сопротивления, возникновение термических напряжений). Тепловые приемники излучения применяются чаще всего для ИК-области, так как для видимого и УФ-диапазонов спектра имеются более чувствительные датчики. Существенным достоинством тепловых приемников излучения является независимость их чувствительности от спектрального состава излучения, т. е. их чувствительность остается почти постоянной от УФ- до ИК-диапазона. В табл. 8.0.1 приведены некоторые типы таких детекторов.

Таблица 8.0.1

Тип датчика	Физический эффект	Выходной параметр
Болометр	Изменение сопротивления металла или полупроводника	Сопротивление
Термобатарея	Миниатюризованное исполнение термопары. Рабочий спай подвергается действию излучения, в то время как опорный спай экранирован	Напряжение
Пироэлектрический детектор	Изменение поляризации некоторых материалов. Реагирует только на изменение излучения	Переменное напряжение

8.1. Датчики положения

С помощью датчиков положения можно бесконтактным способом дистанционно регистрировать процессы перемещения и управлять ими. Пример применения такого датчика показан на рис. 8.1.1.

Например, нужно зарегистрировать вибрацию какого-либо механизма в процессе работы при различных нагрузках. Для этого на нем в характерном месте устанавливают светодиод (излучатель). Излуче-

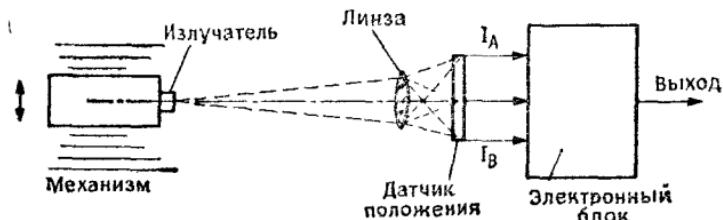


Рис. 8.1.1. Схема устройства для регистрации вибрации механизма.

ние этого светодиода с помощью отображающей оптики (например, линзы) фокусируется на датчике положения.

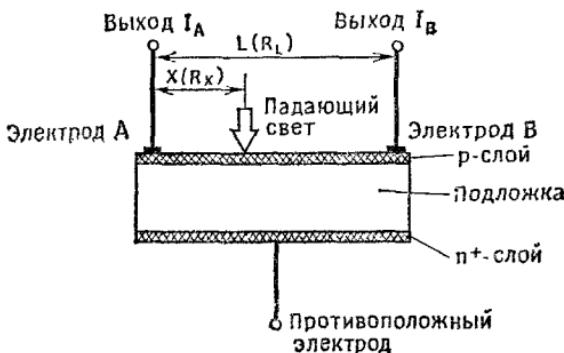


Рис. 8.1.2. Структура датчика положения: подложка из высоко-чистого кремния является i -областью с собственной проводимостью.

В принципе такой датчик состоит из удлиненного pin -диода с двумя выходными электродами с одной стороны и одним электродом с противоположной стороны (рис. 8.1.2).

При неработающем механизме отображающая оптика юстируется таким образом, чтобы на обе части pin -диода попадало излучение одинаковой интенсивности, т. е. $I_A = I_B$. Как только светодиод начинает

перемещаться из-за вибраций механизма, интенсивность перераспределяется и нарушается равенство точек I_A и I_B . В итоге разность $\Delta I = |I_A - I_B|$ оказывается мерой уровня вибрации механизма, которую можно оценивать при разных режимах работы. Характеристики промышленного датчика положения.

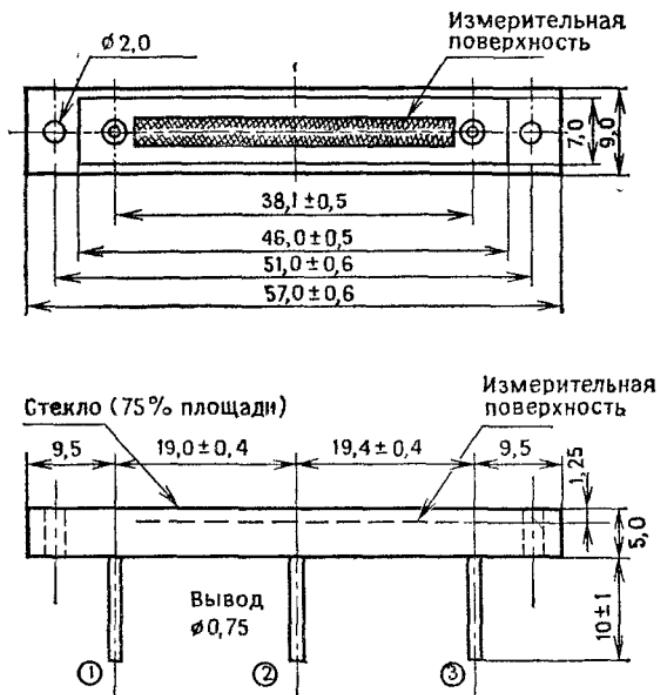


Рис. 8.1.3. Конструктивное исполнение датчика положения.

(тип S1352, фирма Hamamatsu), показанного на рис. 8.1.3, а также его способ действия более подробно описаны ниже.

Важнейшие характеристики датчиков положения графически представлены на рис. 8.1.4. Линейность измерения положения (рис. 8.1.4, б) означает отклонение выходного сигнала от номинального значения (в процентах) при линейном смещении по всей длине датчика (в данном случае 30 мм). Это важнейшая характеристика, и для датчика типа S1352 она соблюдается в пределах погрешности $\pm 1\%$.

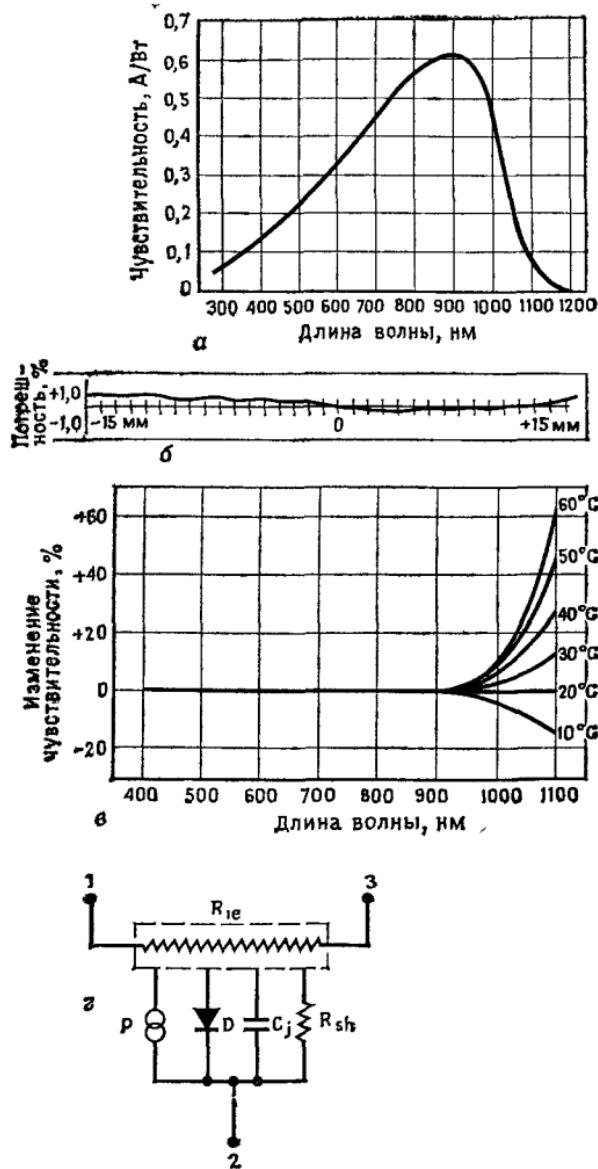


Рис. 8.1.4. Спектральная чувствительность (а), линейность измерения положения (б), температурная зависимость спектральной чувствительности (в) и эквивалентная схема (д) датчика положения: P — генератор фототока; D — идеальный диод; C_j — емкость pn -перехода; R_{sh} — сопротивление шунта; R_{ie} — поверхностное сопротивление.

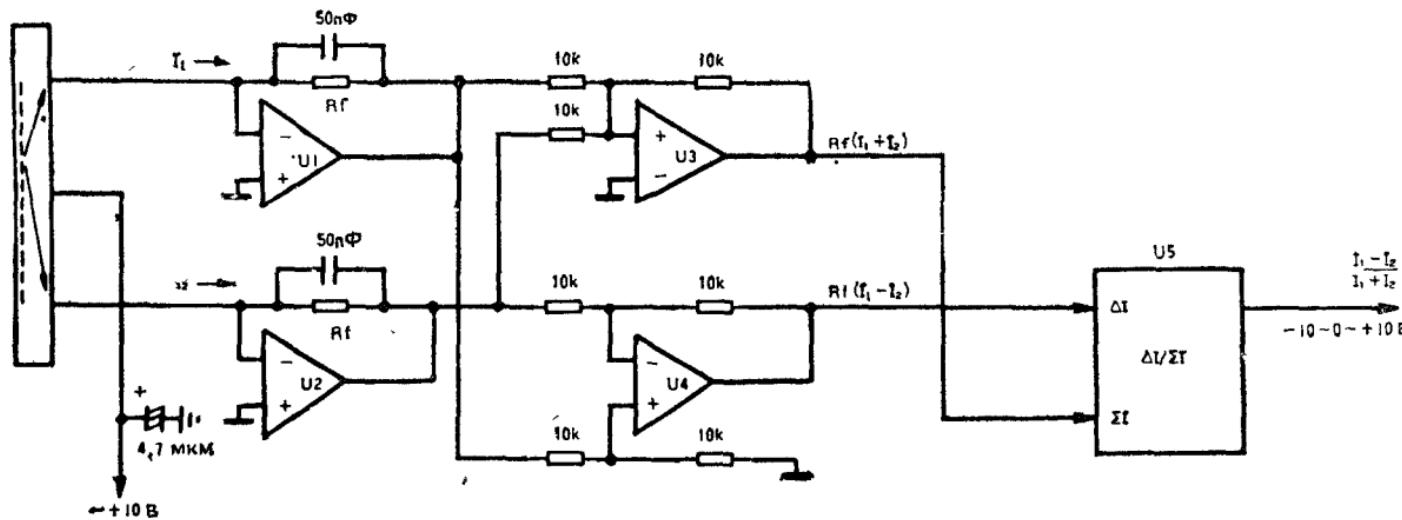


Рис. 8.1.5. Схема измерительного блока (вычислительная схема) к датчику положения. R_f зависит от входного сигнала, $U5$ — аналоговый делитель AD533,

При обработке сигналов датчика (I_1/I_2), как показано на рис. 8.1.5, формируется отношение разности отдельных сигналов I_1 и I_2 к их сумме. Достоинство этого метода заключается в том, что при

этом исключается влияние на точность измерения таких факторов, как изменение мощности излучения светодиода или изменение чувствительности детектора. Во избежание искажения результатов измерений из-за дрейфа нуля или других подобных причин в качестве операционных усилителей 1...4 необходимо использовать интегральные схемы, отвечающие высоким требованиям к качеству обработки сигнала.

Типичными примерами применения оптических датчиков положения являются измерения протяженных объектов (например, туннелей, зданий, конструкций) с помощью луча лазера, направляемого на датчик. Отклонение луча от центра датчика вследствие

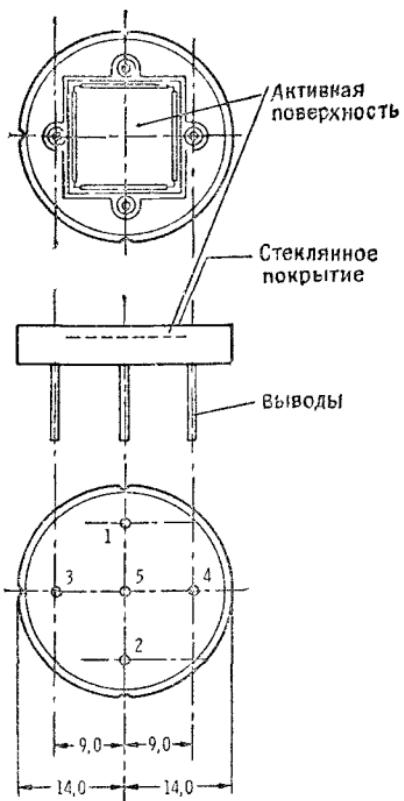


Рис. 8.1.6. Конструктивное исполнение двухкоординатного датчика положения.

перемещений или вибраций может быть измерено с большой точностью.

Двухкоординатное измерение

Двухкоординатное измерение положения добавляет еще одну степень свободы при определении положения или размещении (позиционировании) объекта.

Датчик этого типа состоит из активной поверхности в форме квадрата, на каждой стороне которого

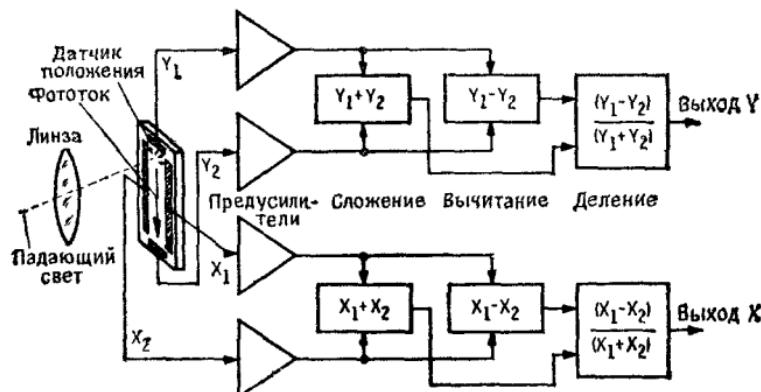


Рис. 8.1.7. Схема измерительного блока (вычислительная схема) двухкоординатного датчика положения.

имеется по электроду (рис. 8.1.6). Противоположные электроды предназначены соответственно для опреде-

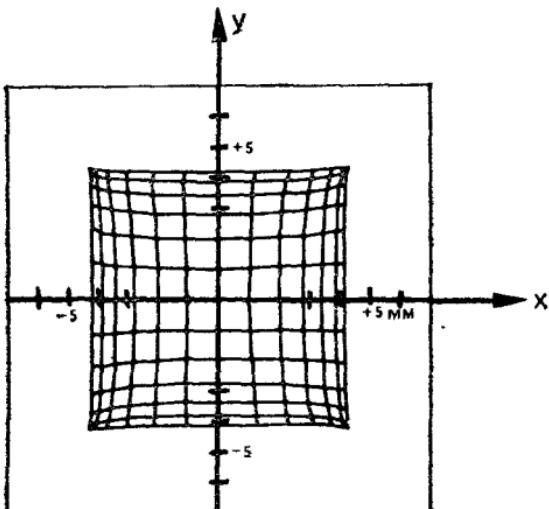


Рис. 8.1.8. Типичная линейность измерения положения.

ления смещений по осям X и Y , как показано на рис. 8.1.7. Сигналы Y_1 и Y_2 с помощью предусилителей согласуются с вычислительной схемой, форми-

рующей отношение разности сигналов к их сумме. Процесс вычисления аналогичен осуществляющему в линейных датчиках положения. Благодаря дополнительной степени свободы (по оси X) осуществляется двухкоординатное измерение положения.

Линейность XY -позиционирования показана на рис. 8.1.8. Она представляет собой меру точности

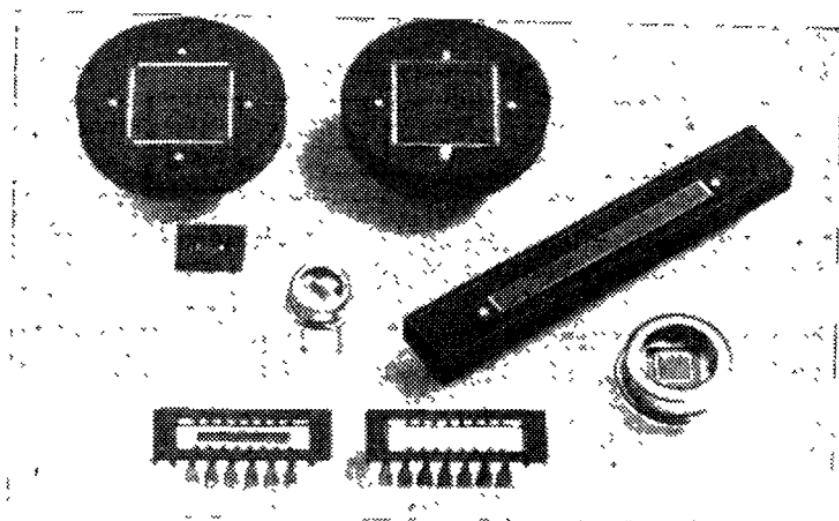


Рис. 8.1.9. Конструктивное исполнение различных датчиков положения.

определения положения. Область применения датчиков этого типа в принципе та же, что и у линейных. Ассортимент конструктивных форм датчиков положения иллюстрируется на рис. 8.1.9.

8.2. Датчики изображения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС)

Для осуществления межоперационного контроля технологического процесса необходимо постоянное наблюдение за качеством продукции (геометрические допуски, однородность, качество поверхности и т. п.). До недавнего времени эти характеристики качества оценивались исключительно визуально, т. е. путем

осмотра контролером. Однако благодаря внедрению датчиков изображения удалось полностью автоматизировать такого рода контрольные операции и встроить их в непрерывный производственный процесс. Преимуществами автоматизированного контроля являются прежде всего более высокие надежность и производительность. На рис. 8.2.1 показана работа установки автоматического контроля бутылок с помощью датчиков изображения. При производстве напитков предусматривается многократное использование бутылок с мойкой их перед каждым использованием. В связи с этим на моечных установках необходим контроль бутылок на чистоту, наличие повреждений, посторонних тел и остатков моющих средств. Такой контроль осуществляется специальным способом. Находящаяся на транспортере бутылка освещается с одной стороны щелевым источником света и отображается с помощью оптики на датчике изображения. В качестве последнего в данном случае применяется одномерный (щелевой) датчик с 256 элементами изображения.

При последовательном просмотре отдельных участков бутылки (т. е. при ее сканировании) сканирующий луч проходит с первого элемента до 256-го, так что вся бутылка просматривается сверху донизу. Регистрация на каждой ячейке датчика длится около 1,5 мс. Поскольку бутылка продвигается мимо датчика с постоянной скоростью, все «слои» можно последовательно просматривать один за другим. В итоге после просмотра всех слоев с первого до n -го получают полное изображение бутылки.

Получающееся в результате изображение с различными переходами яркости (уровнями серого) позволяет судить о качестве отмычки и наличии дефектов. Поскольку одна камера регистрирует участок составляющий около 60 % периметра бутылки, необходима вторая камера, оптическая ось которой перпендикулярна оптической оси первой камеры.

Задачи управления, например сканирование ячеек датчика, накопление в памяти, принятие решения и т. д., полностью выполняются микро-ЭВМ.

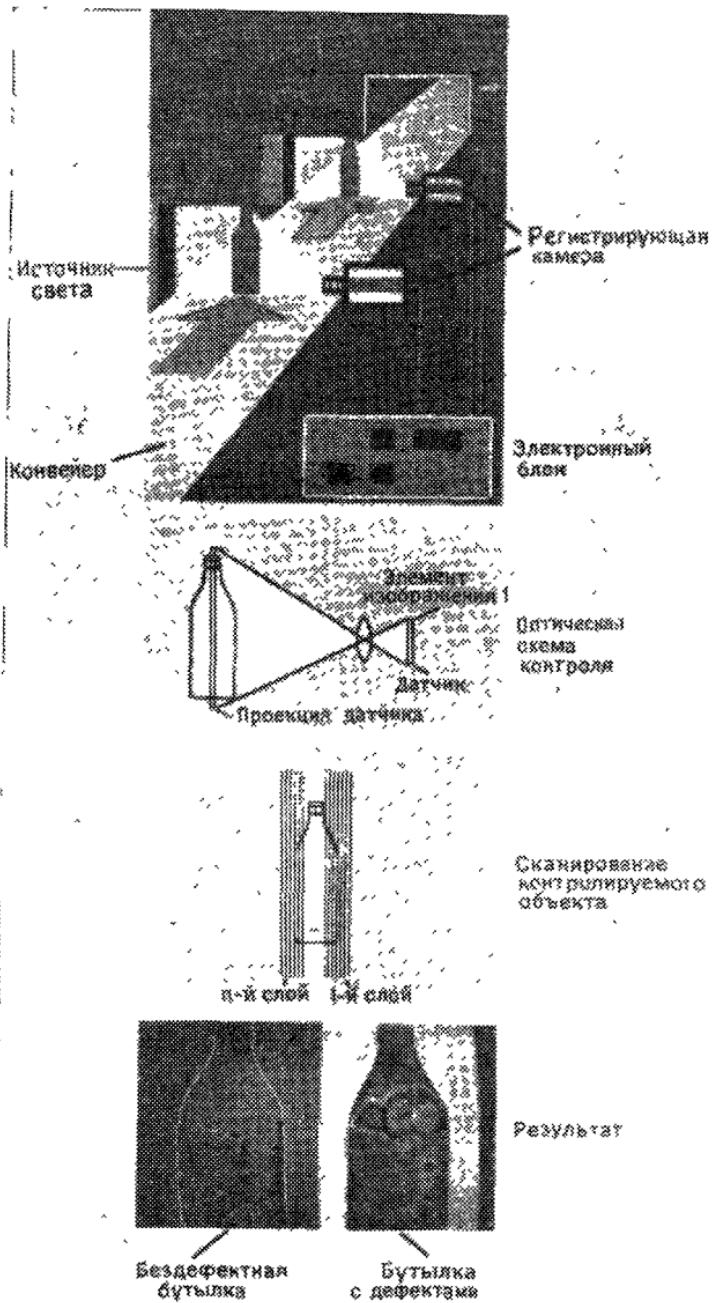


Рис. 8.2.1. Применение датчика изображения на основе ПЗС в процессе технологического контроля бутылок после мойки.

Принцип действия датчиков изображения на ПЗС

Датчики изображения на ПЗС состоят из кремниевых МОП-конденсаторов или МОП-фотодиодов, соединенных в виде последовательного ряда или матрицы. На рис. 8.2.2 схематически показано устройство такого датчика.

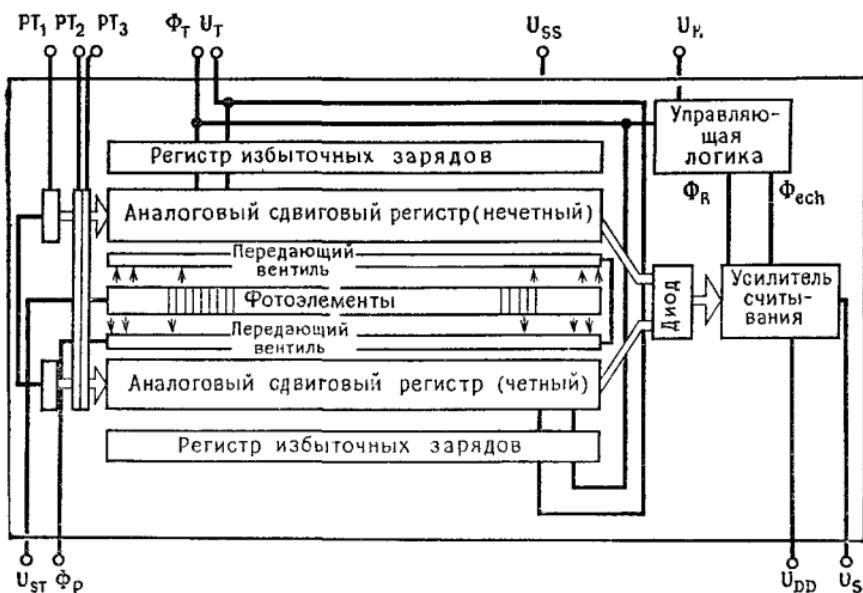


Рис. 8.2.2. Блок-схема датчика изображения на основе ПЗС.

В случае линейного (однокоординатного) датчика изображения несколько сотен фотоэлементов располагаются последовательно. Так, датчик изображения на ПЗС типа TH7803 (фирма Thomson CSF) состоит из 1728 элементов, расположенных в один ряд. Среднее расстояние между этими фотоэлементами размером 10×13 мкм составляет 10 мкм, в результате чего на строке ПЗС длиной 17,28 мм достигается оптическое разрешение 50 линий на 1 мм.

В качестве фотоэлементов применяются пассивированные фотодиоды *pr*-типа. Каждому фотодиоду соответствует отдельный МОП-конденсатор как элемент памяти.

Такая структура обеспечивает высокую чувствительность датчика, поскольку падающий свет не поглощается частично электродами, как это имеет место в случае структур из МОП-фотоконденсаторов.

На обоих концах строки датчика экранировано по 4 фотоэлемента, которые постоянно выдают эталонный сигнал, соответствующий темновому напряжению.

Строка датчика отделена от обоих сдвиговых регистров соответствующими затворами, при открытии которых накопленный заряд в параллельном режиме может быть перенесен в сдвиговый регистр.

На каждой стороне строки датчика расположены сдвиговый регистр, который принимает заряды из четных или нечетных фотоэлементов и сдвигает их к выходу. Для изоляции этих двух регистров относительно внешнего поля и для подавления возникающих из-за него помех — темнового тока и шумов — параллельно к ним подключено еще по одному регистру.

Выходы обоих сдвиговых регистров подключены к диоду, который в мультиплексном режиме воспринимает заряды из обоих регистров и преобразует их в соответствующее напряжение. Перед подачей каждого нового пакета зарядов на диод с МОП-транзистора подается соответствующее опорное напряжение, предотвращающее наложение различных пакетов зарядов.

Получающиеся на диоде импульсы напряжения подаются на усилитель со схемой дискретизации и запоминания отсчетов. С выхода усилителя может быть снят видеосигнал с низким импедансом, отражающий распределение силы света по анализируемой строке.

Внутренние логические схемы управления генерируют тактовые импульсы Φ_R сброса на нуль и импульсы сканирования Φ_{ech} . Благодаря этому можно управлять датчиком изображения только двумя внешними тактовыми импульсами, а именно импульсами передачи Φ_P и Φ_T . На рис. 8.2.3 представлены важ-

нейшие характеристики типичного датчика изображения на ПЗС.

Спектральная чувствительность (рис. 8.2.3, а) распространяется на диапазон длин волн от 400 нм до

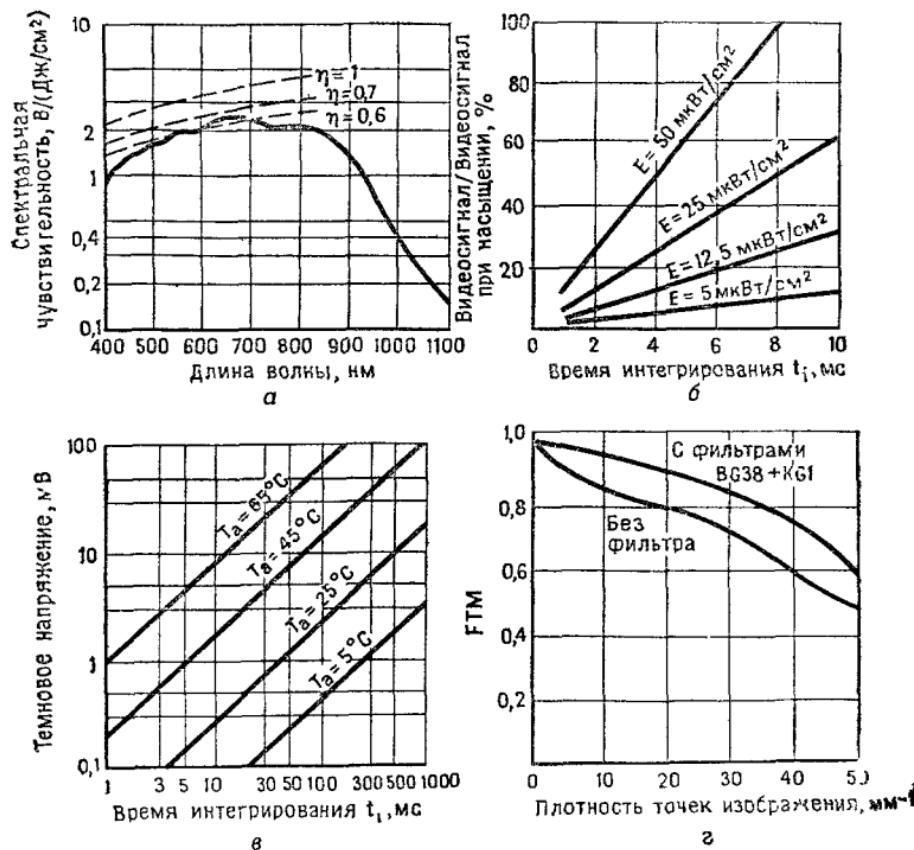


Рис. 8.2.3. Характеристики датчика изображения на основе ПЗС.

≈ 1000 нм, так что может быть зарегистрирован весь диапазон видимого света.

Выходной видеосигнал зависит как от времени интегрирования (t_1), так и от энергии падающего излучения (E). Оба параметра непосредственно связаны (линейно) с выходным напряжением (рис. 8.2.3, б).

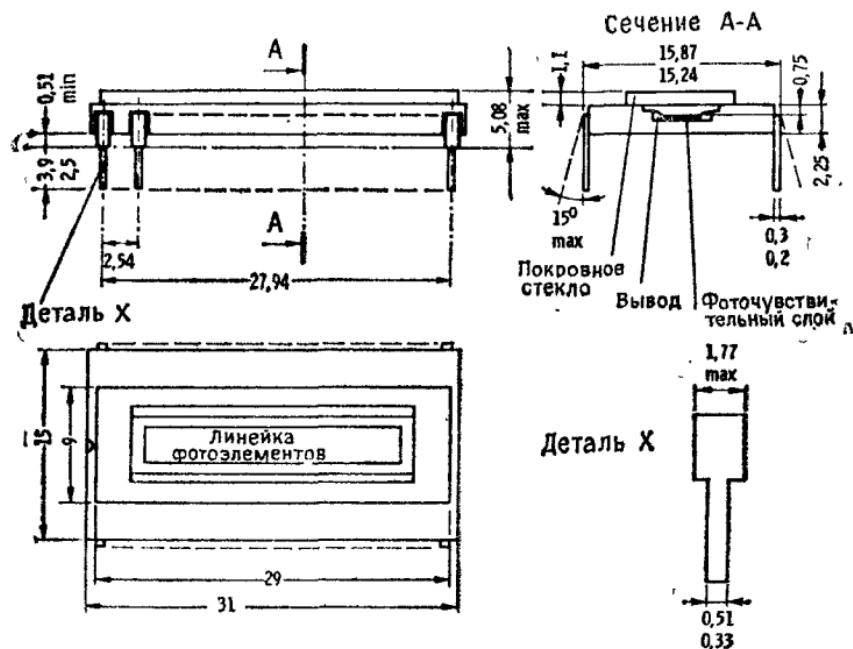


Рис. 8.2.4. Конструктивное исполнение однокоординатного датчика изображения на основе ПЗС.

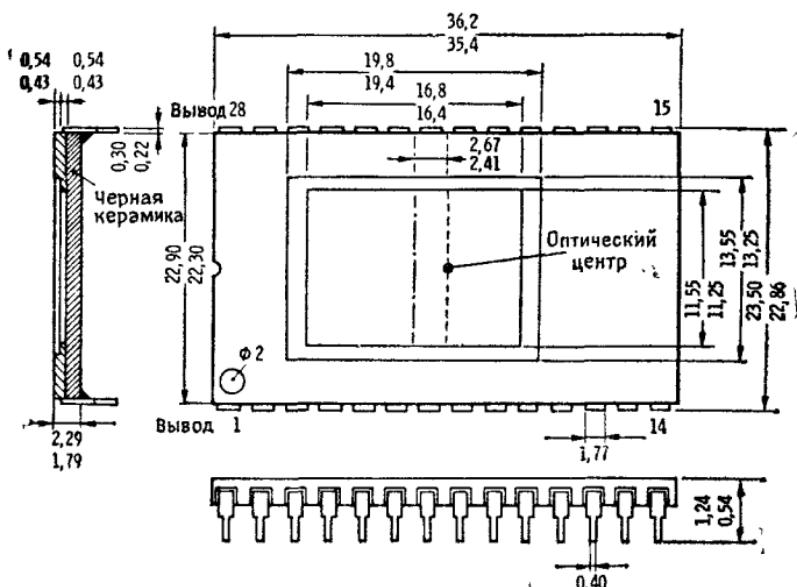


Рис. 8.2.5. Конструктивное исполнение двухкоординатного датчика изображения на основе ПЗС.

Модуляционная характеристика (FTM) определяется выражением

$$FTM = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min} - 2U_{SO}},$$

где U_{SO} — темновое напряжение. Эта характеристика справедлива для определенной спектральной области

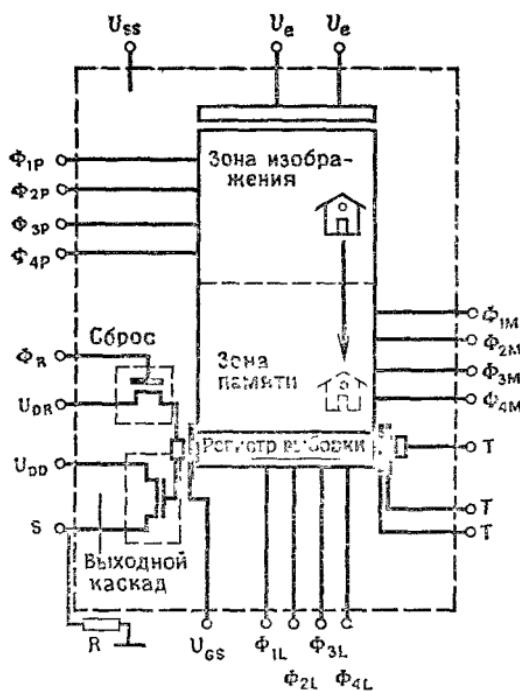


Рис.8.2.6. Устройство ПЗС-матрицы.

Тактовые импульсы и напряжения

$\Phi_{1P}, \Phi_{2P}, \Phi_{3P}, \Phi_{4P}$	Тактовые импульсы зоны изображения
$\Phi_{1M}, \Phi_{2M}, \Phi_{3M}, \Phi_{4M}$	Тактовые импульсы зоны памяти
$\Phi_{1L}, \Phi_{2L}, \Phi_{3L}, \Phi_{4L}$	Тактовые импульсы регистра выборки
Φ_R	Импульс сброса
U_{DD}	Напряжение стока выходного каскада
U_{DR}	Напряжение сброса транзистора сброса
U_{SS}	Напряжение подложки
U_e	Напряжение регулировки изображения
U_{GS}	Напряжение смещения выходного вентиля регистра выборки
S	Выход видеосигнала
T	Гнездо подключения измерительного прибора

и определенной фотографии. Она включает в себя, кроме того, FTM принимаемого объекта.

Темновое напряжение U_{SO} ограничивает разрешающую способность датчика изображения на ПЗС. Охлаждением датчика до $\approx 10^{\circ}\text{C}$ предельное разрешение для некоторых применений можно значительно улучшить (рис. 8.2.3, в).

На рис. 8.2.4 показан однокоординатный датчик изображения на ПЗС. Аналогичный датчик на рис. 8.2.5 предназначен для двухкоординатных изме-

рений и имеет плоскость изображения матричного типа. Конструкция ПЗС-матрицы (датчик изображения типа THX 31133, фирма Thomson-CSF) из

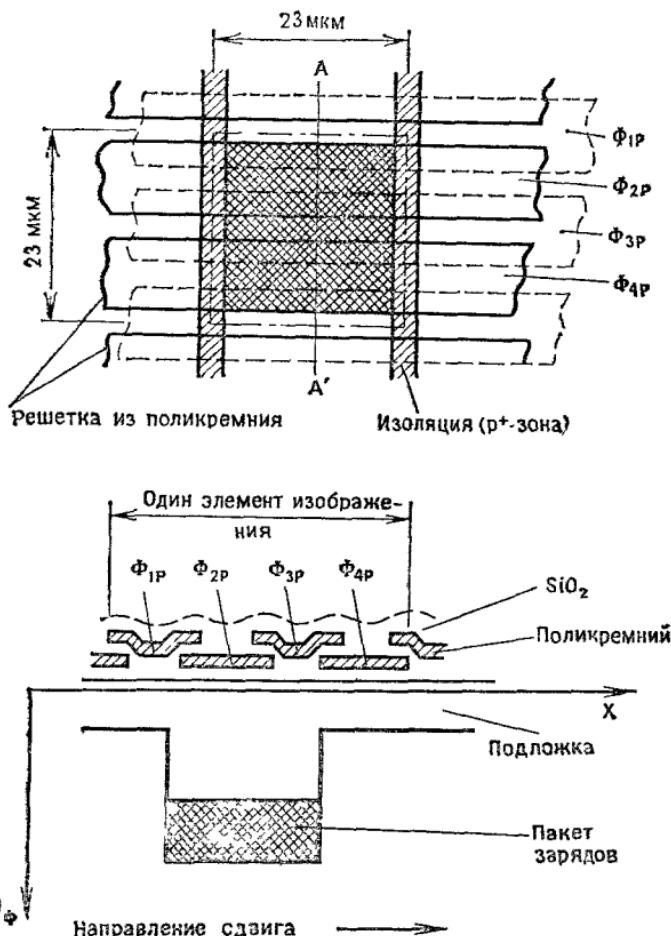


Рис. 8.2.7. Устройство элемента изображения.

576×384 точек изображения, как показано на рис. 8.2.6, разработана для производства по телевизионному стандарту МККР (625 строк, 50 Гц). При помощи синхронизирующего сигнала полный телевизионный сигнал можно наблюдать на телемониторе.

Тем самым создается возможность выполнения задач по автоматизации, как, например, распознавание контура, процессы сортировки, обнаружение примесей в твердых и жидких материалах, а также определение геометрических размеров.

Устройство отдельного элемента изображения показано на рис. 8.2.7. Размеры одной точки изображения составляют 23×23 мкм, тогда как весь размер изображения равен 6623×8832 мкм.

При формировании выходного видеосигнала сигнал изображения переносится построчно из зоны изображения в зону памяти. После этого зона изображения готова для принятия следующего изображения. За это время сигнал из зоны памяти построчно переносится в регистр считывания и передается в выходной каскад для формирования видеосигнала с низким импедансом.

Датчики изображения на ПЗС находят множество применений в области оптических измерений, типичным примером которых является описанная ниже измерительная задача.

8.3. Датчик шероховатости

Контроль качества поверхности деталей при автоматизированном производстве оказывается возможным благодаря применению линейных датчиков изображения (или последовательного ряда фотодиодов). На рис. 8.3.1 иллюстрируется принципиальное устройство датчика шероховатости (тип RM400S, фирма Rodenstock). Действие этого датчика основано на измерении светорассеяния.

Пучок света, испускаемый ИК-светодиодом ($\lambda_0 = 810$ нм), фокусируется объективом на детали. Световое пятно на поверхности детали обычно имеет размер около 1,8 мм, а в специальных случаях — 0,2...4 мм. В зависимости от качества поверхности обследуемого объекта в зоне светового пятна происходит рассеяние света, который с помощью светоделильной пластинки направляется на датчик изображения. Дисперсия распределения рассеянного света

дает характеристику оптической шероховатости поверхности S_N :

$$S_N = g \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2 p_i,$$

где i — номер фотодиода, p_i — интенсивность, регистрируемая i -м фотодиодом, \bar{i} — номер фотодиода,

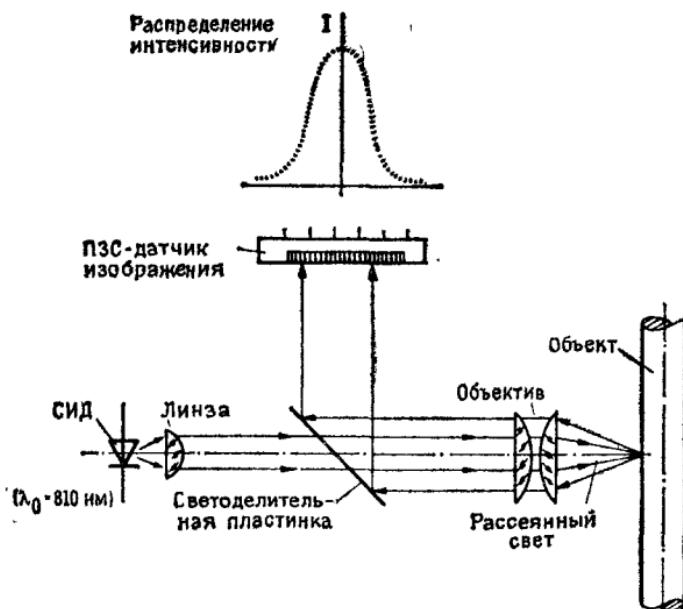


Рис. 8.3.1. Принцип действия датчика шероховатости.

усредненного по интенсивности, g — нормирующий множитель.

Расчет выполняется, естественно, микропроцессором, позволяющим обрабатывать около 20 измерений за 1 с.

На рис. 8.3.2 изображены поверхности различного качества, характерные для деталей, изготовленных точением, шлифованием и прокаткой. При точении и шлифовании получается равномерный бороздчатый профиль, тогда как прокатанная поверхность имеет нерегулярный рельеф. Это различие отчетливо прояв-

ляется в характере светорассеяния, так как в противоположность точеной и шлифованной поверхности прокатанная поверхность имеет центросимметричное распределение интенсивности рассеянного света.

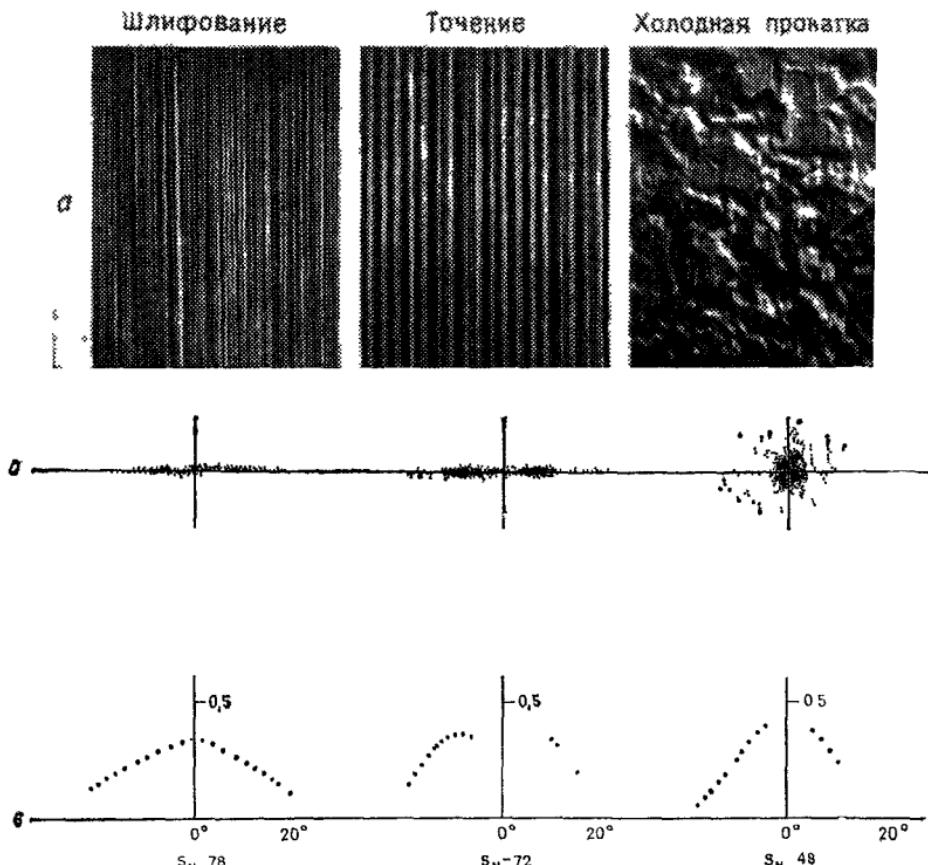


Рис. 8.3.2 Внешний вид поверхностей деталей, обработанных различным образом (a), соответствующие картины рассеяния света на датчике изображения (б) и кривые распределения рассеянного света (в)

Оптические характеристики шероховатости S_N точеной и шлифованной поверхностей, определенные по кривым распределения светорассеяния (рис. 8.3.2) отличаются незначительно (72 и 78 соответственно), тогда как для прокатанной поверхности $S_N = 48$.

Целиком измерительная установка с датчиком шероховатости RM400S показана на рис. 8.3.3. На переднем плане видны обследуемые детали, анализи-

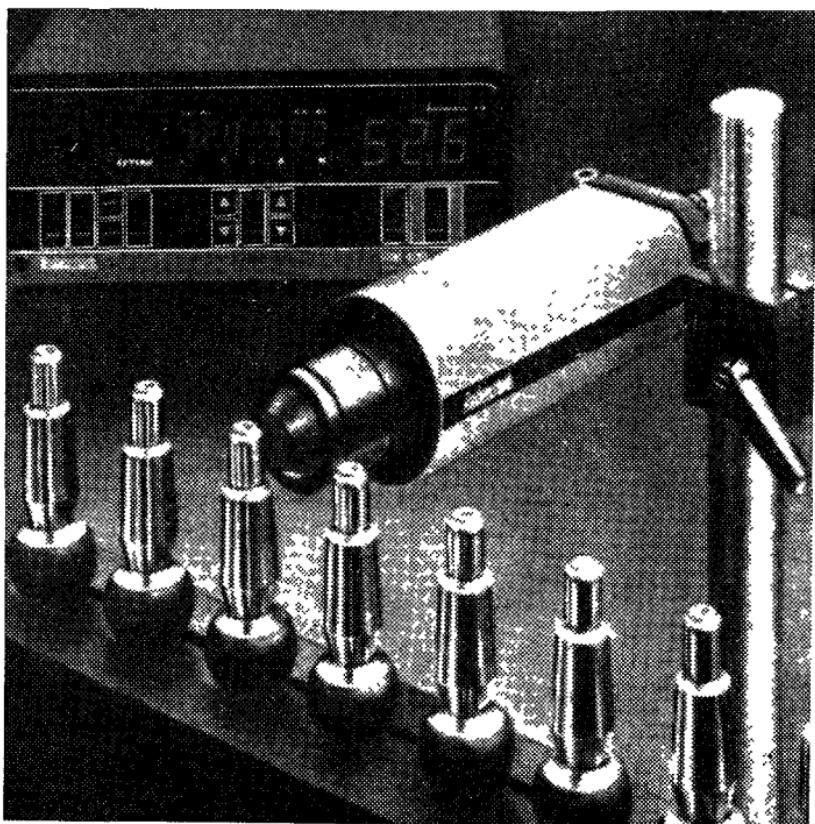


Рис. 8.3.3. Применение датчика шероховатости при контроле точенных деталей.

руемые датчиком. На заднем плане расположен блок управления с микропроцессором.

8.4. Датчики ИК-излучения

Для ИК-диапазона от 0,8 до 12 мкм существует множество датчиков излучения (рис. 8.4.1) на основе селенида свинца ($PbSe$), сульфида свинца (PbS),

арсенида индия (InAs), антимонида индия (InSb) и германия, а также пироэлектрические детекторы.

Важной областью применения таких детекторов является обнаружение людей (например, при защите

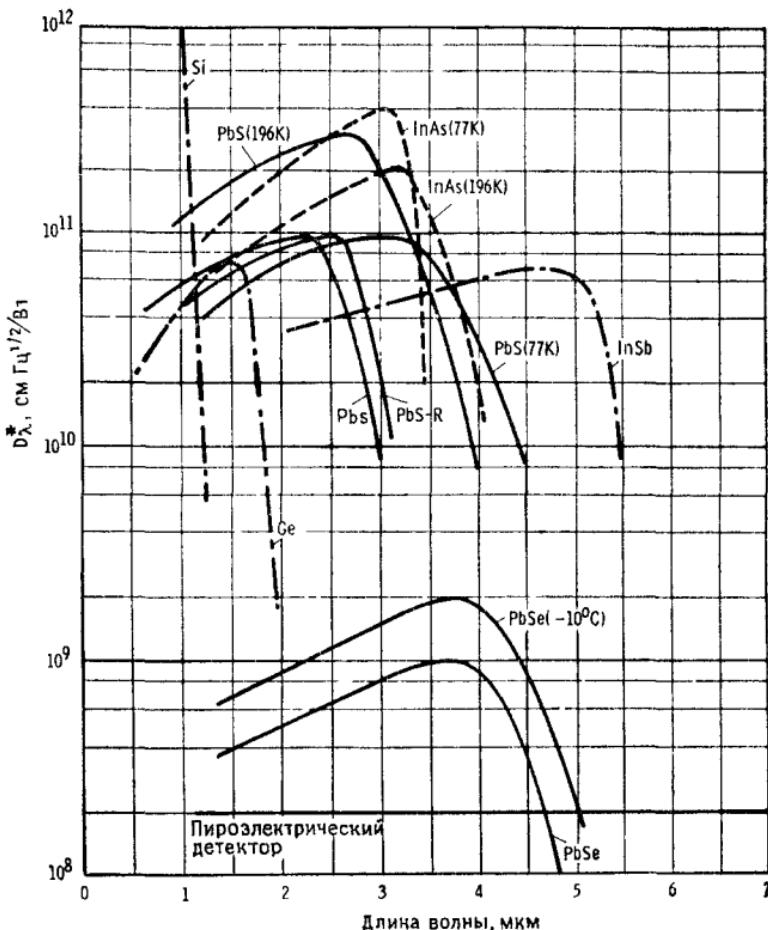


Рис.8.4.1. Характеристики спектральной чувствительности различных датчиков ИК-излучения.

от взлома помещений и зданий). При рассмотрении спектрального состава ИК-излучения, испускаемого человеком при температуре тела около $36,4^{\circ}\text{C}$ (рис. 8.4.2), можно отметить отчетливый максимум в области длин волн около 10 мкм. Для этого спектрального диапазона могут быть приняты во внимание

^{1/2}6*

только широкополосные ИК-датчики типа пироэлектрических детекторов.

Пироэлектрический эффект возникает в результате смещения зарядов в некоторых кристаллах при их нагреве (рис. 8.4.3).

Этот эффект не аналогичен описанному в разд. 2.2 термоэлектрическому эффекту, так как в данном случае не возникает постоянного напряжения.

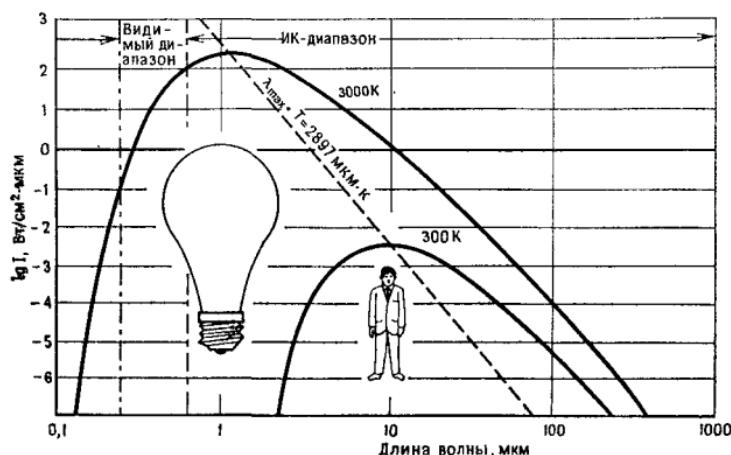


Рис. 8.4.2. Распределение интенсивности (I) ИК-излучения, испускаемого лампой накаливания и человеческим телом.

При резком воздействии ИК-излучения на пироэлектрический детектор, вызывающем его нагрев, напряжение или ток (в зависимости от вида схемы) изменяются лишь кратковременно, а затем спадают до нуля даже и при сохраняющемся действии облучения (см. рис. 8.4.4).

Эквивалентную схему пироэлектрического детектора можно представить в виде параллельного (при измерении тока) или последовательного (при измерении напряжения) соединения конденсатора и генератора (источника тока или напряжения), как показано на рис. 8.4.5.

Чувствительность как по току, так и по напряжению зависит от частоты падающего излучения (рис. 8.4.6). Ниже 10 Гц предпочтительно усиление

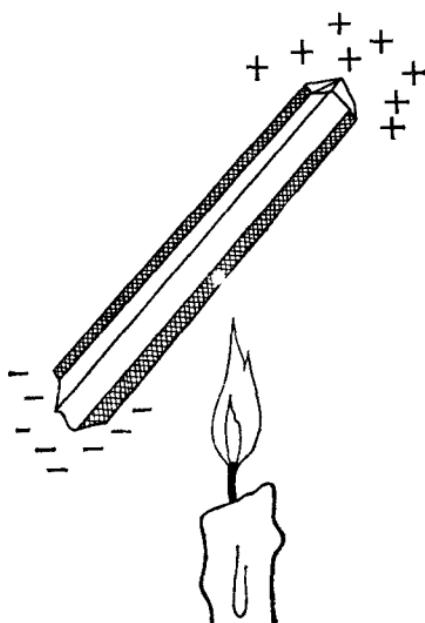


Рис. 8.4.3. Пироэлектрический эффект (перераспределение зарядов в нагретом кристалле).

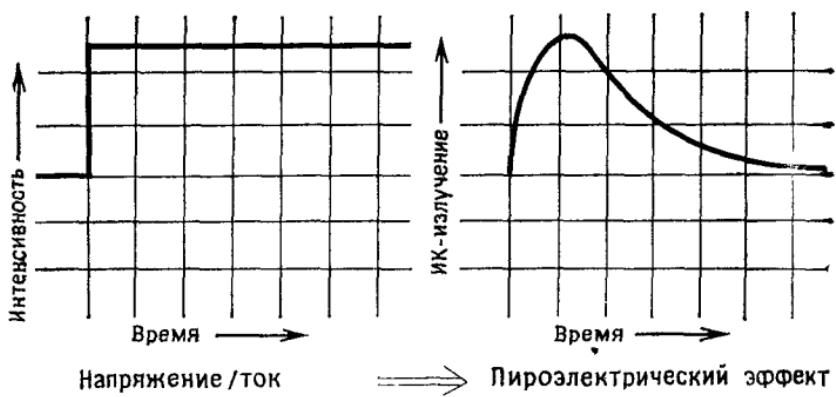


Рис. 8.4.4. Возбуждение и ответный сигнал пироэлектрического детектора.

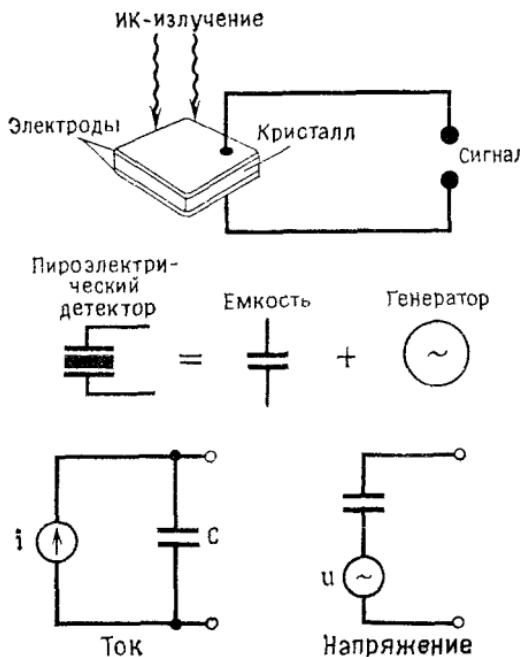


Рис. 8.4.5. Эквивалентная схема пироэлектрического детектора.

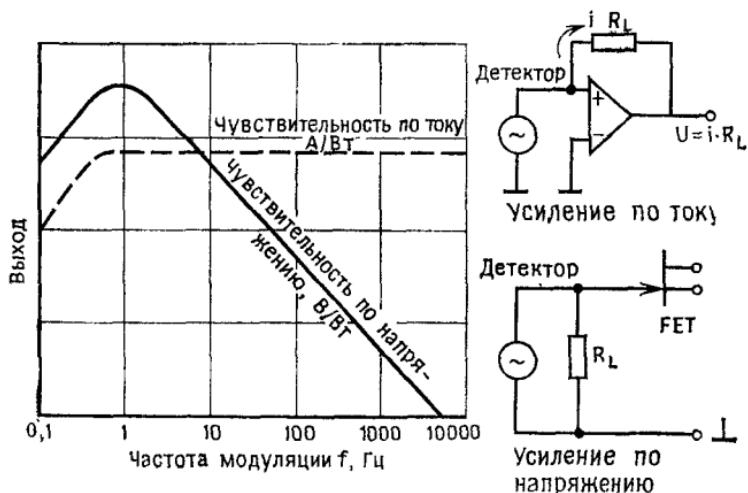


Рис. 8.4.6. Частотная характеристика пироэлектрического детектора с различными схемами усиления: FET — усилитель на полевом транзисторе.

по напряжению, тогда как в случае высокочастотных широкополосных сигналов более целесообразно усиление по току.

При обнаружении людей (при их передвижении) сигнал находится в области нескольких герц, так что в этом случае применимо усиление по напряжению.

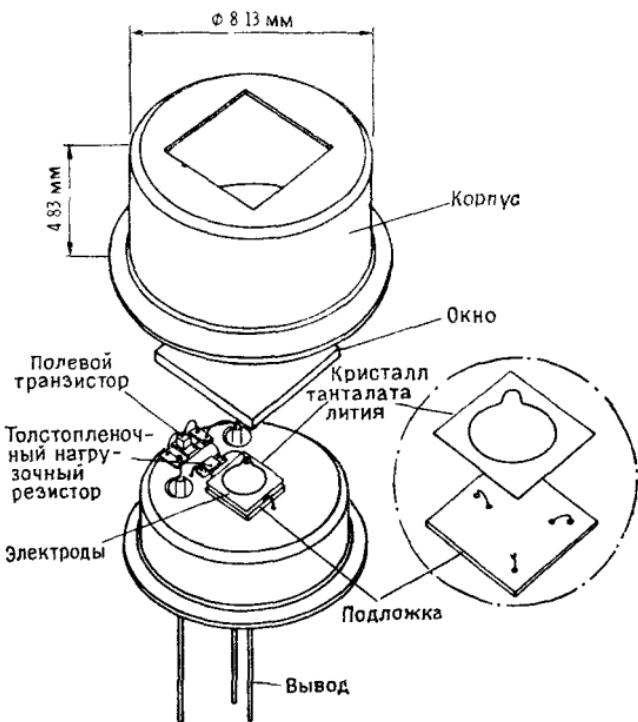


Рис. 8.4.7. Устройство пироэлектрического датчика в металлическом корпусе со встроенным предусилителем сигнала. Справа в кружке дано увеличенное изображение подключения электродов.

На рис. 8.4.7 полностью показано устройство датчика с интегральным предусилителем на основе полевого транзистора и с нагрузочным сопротивлением в миниатюрном исполнении.

Кроме использования в пассивных оградительных системах, такого рода датчики находят применение в схемах контроля за работой горелок, в пожарных

извещателях, системах контроля окружающей среды, газоанализаторах, установках для измерения излучения и в реле близости.

8.5. Волоконно-оптические датчики

Разработке волоконно-оптических датчиков способствовали и способствуют прежде всего достижения в изготовлении стеклянных волокон и их системных компонентов (разъемов, источников света, детекторов и т. п.). Попадающий в волоконно-оптический детектор световой пучок от источника света (рис. 8.5.1) под действием измеряемого параметра

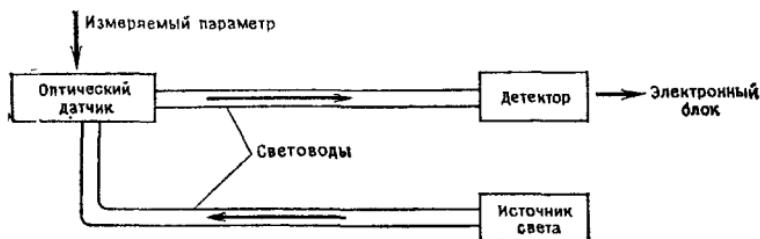


Рис. 8.5.1. Схема волоконно-оптического датчика для измерения различных параметров (температуры, уровня, давления и др.).

(например, давления, температуры, уровня и т. п.) претерпевает в детекторе изменение по интенсивности, поляризации, фазе или цвету и тем самым обеспечивает получение информации. Распространение световых волн внутри датчика осуществляется по стеклянным волокнам, применяемым, например, в технике связи. Эти датчики новых типов находят применение прежде всего в условиях, характеризуемых наличием агрессивных паров или взрывоопасных газовых смесей, в зонах повышенной радиоактивности и сильных электромагнитных полей. Из множества используемых в настоящее время волоконно-оптических датчиков ниже описаны три характерных типа.

Датчик уровня

На рис. 8.5.2, а показан волоконно-оптический датчик, обеспечивающий точное измерение уровня, т. е.

его превышение или занижение относительно заданного значения. Свет от светодиода по световоду направляется к коническому окончанию датчика и, отразившись от него, попадает на детектор. При погружении конического конца в жидкость свет не отражается и не попадает на детектор.

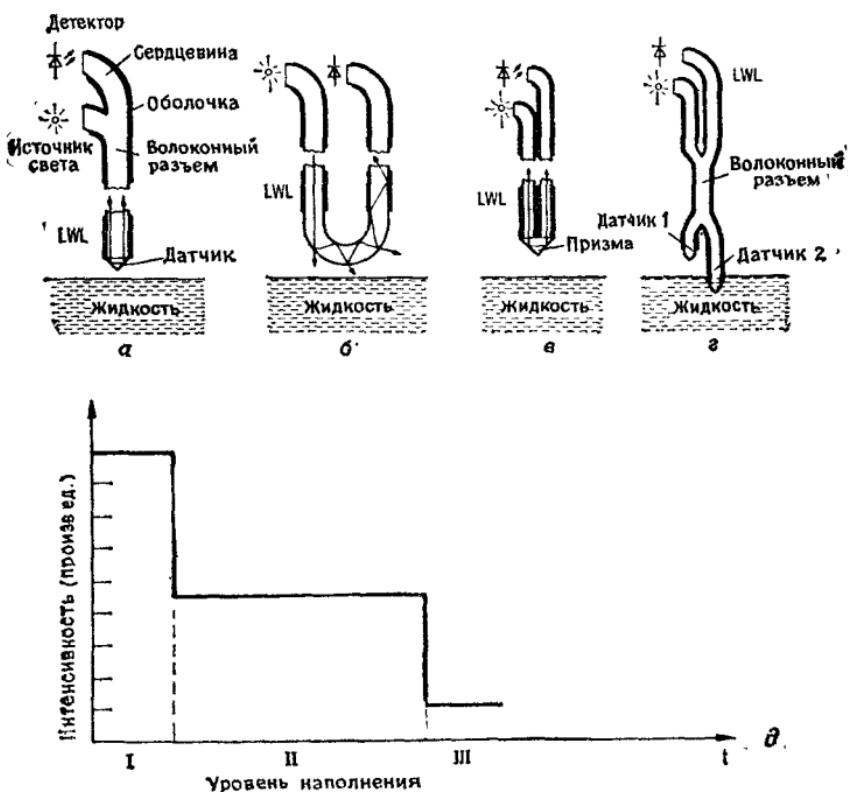


Рис. 8.5.2. Конструктивные исполнения волоконно-оптических датчиков уровня: LWL — световод; I — оба датчика сухие; II — погружен датчик 2; III — погружены оба датчика.

нии конического конца датчика в жидкость разность показателей преломления изменяется, и отклонявшийся ранее из-за полного отражения свет выходит из конического конца датчика и уже не попадает на детектор. Получающееся в результате изменение интенсивности света служит сигналом о достижении заданного уровня. Принцип действия *U*-образного датчика уровня аналогичен (рис. 8.5.2, б): как только

освобожденная от оболочки изогнутая часть волокна световода окажется погруженной в жидкость, детектор регистрирует изменение интенсивности света. Заметим, что подвод и отвод излучения можно осуществлять по двум различным световодам, как показано на рис. 8.5.2, в. В этом случае свет отклоняется призмой.

Для двухпозиционного измерения уровня пригодно устройство, изображенное на рис. 8.5.2, г. Здесь интенсивность на детекторе претерпевает два скачка, а именно при погружении датчиков 1 и 2 соответственно (см. рис. 8.5.2, д).

Эту схему можно расширить, соединяя несколько таких концевых датчиков (с двумя точками замера каждый) в единую систему. В результате с помощью 5 концевых датчиков можно контролировать 10 точек, что обеспечивает почти непрерывный контроль уровня.

Волоконно-оптический датчик температуры

По сравнению с обычными способами (гл. 2) измерение температуры с помощью волоконно-оптических датчиков значительно более трудоемко. Однако для определенных случаев применения эти затраты оправданы, так как известные способы оказываются подверженными действию помех. Сюда прежде всего относятся следующие области применения:

- При промышленном использовании ВЧ- и микроволновой техники (пищевая промышленность, вулканизация, прогрев kleев, нанесение пластиковых покрытий, индукционный нагрев и т. д.).
- В химической технологии (измерение температуры в сильнокоррозионных средах, в электрохимических процессах, в случае взрывоопасных и легко воспламеняющихся материалов).
- В электротехнической и электронной промышленности (компоненты схем высокого напряжения, тепловые характеристики управляющих цепей и электронных компонентов, измерения при изготовлении полупроводников, горячие зоны в трансформаторах высокой мощности и т. д.).

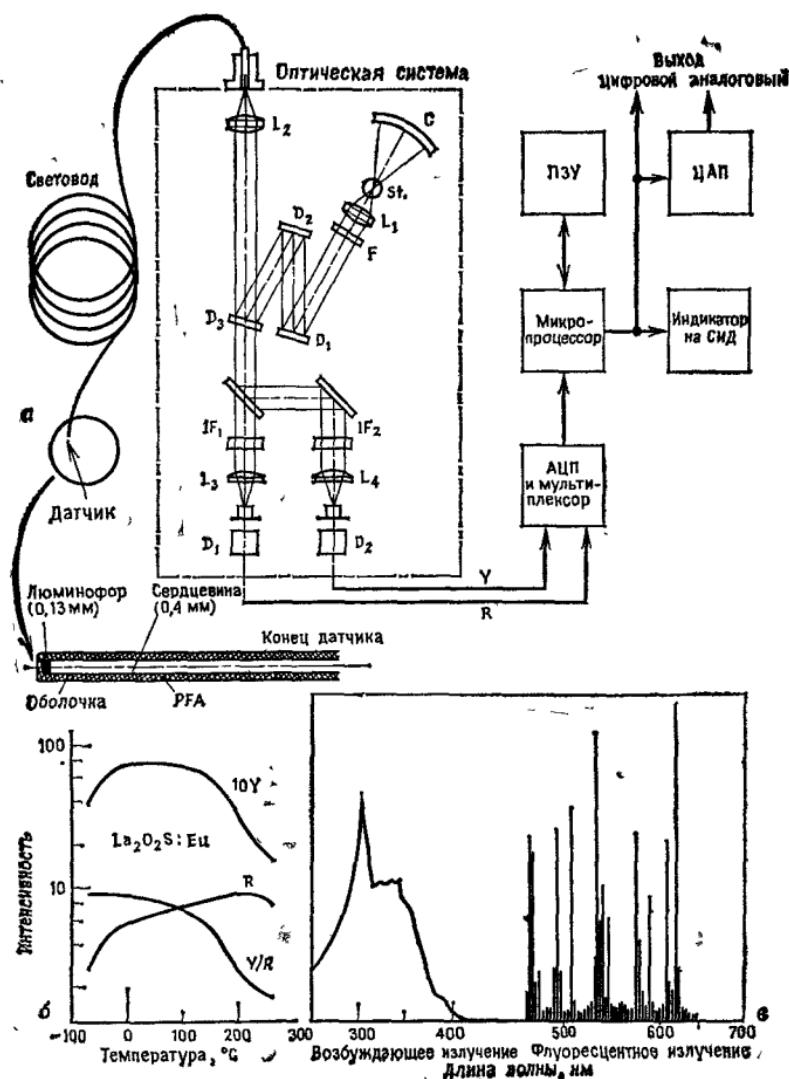


Рис. 8.5.3. Устройство волоконно-оптического датчика температуры (а), зависимость интенсивности спектральных линий Y и R от температуры (б) и распределение интенсивности возбуждающего и флуоресцентного излучения (в).

- В биологии и медицине (биологические эффекты при воздействии электромагнитного излучения, перегревы из-за воздействия микроволнового излучения и т. д.).

- В исследовательской практике (измерение мельчайших образцов, измерения при наличии электрических полей, ВЧ-плазмы или электронных пучков, точное измерение поверхностей материалов с плохой электропроводностью).

Принцип действия волоконно-оптического датчика температуры основан на температурной зависимости интенсивности различных флуоресцентных линий некоторых люминофоров. Устройство такого датчика показано на рис. 8.5.3. Через систему отображения ($L_1, F, D_1 \dots D_3, L_3$) испускаемое источником (S_i) УФ-излучение фокусируется в кварцевом световоде, конец которого покрыт слоем тефлона PFA (наружный диаметр 0,7 мм). На конце световода находится слой люминофора ($\text{La}_2\text{O}_3 : \text{Eu}$) толщиной 0,13 мм, который под действием УФ-излучения испускает флуоресцентное излучение в спектральном диапазоне 500...600 нм. Это излучение в свою очередь снова направляется по световоду в оптическую систему, где из него фильтрами IF_1 и IF_2 выделяются две специфические линии Y и R . Отношение интенсивностей Y/R , определяемое электронным способом является монотонной функцией температуры в области от -50 до $+250^\circ\text{C}$. Разрешение равно $0,1^\circ\text{C}$ при погрешности $\pm 2^\circ\text{C}$.

Измерение тока

На рис. 8.5.4 изображен датчик для бесконтактного измерения тока в диапазоне 0,2...6000 А. Используемый здесь принцип измерения основан на эффекте Фарадея.

Линейно-поляризованный луч лазера вводится в катушку из световода, по оси которой проходит токонесущий кабель. Под действием тока I плоскость поляризации света поворачивается (эффект Фарадея) на угол $\alpha(I) = 2NVI$, где N — число витков световода

вокруг кабеля, V — постоянная Верде материала световода.

Затем с помощью призмы Волластона (WP) взаимно перпендикулярные компоненты поляризации на-

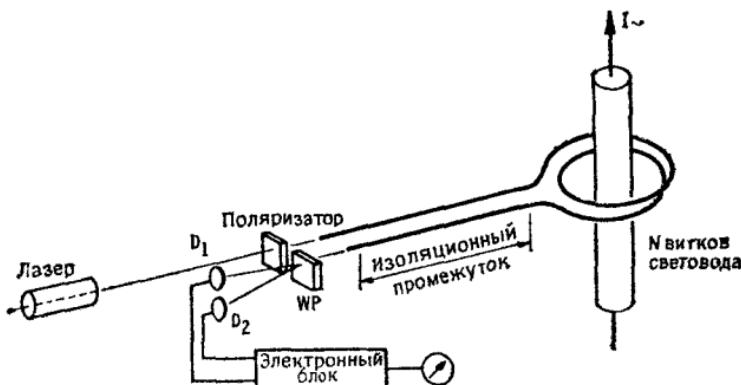


Рис. 8.5.4. Волоконно-оптический датчик для измерения переменного тока на основе эффекта Фарадея.

правляются на детекторы D_1 и D_2 . Сигналы детекторов подаются далее на вычислительный прибор. В итоге результаты измерений имеют отклонение от линейности менее 1 %.

ГЛАВА 9

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Возможные области применения датчиков чрезвычайно разнообразны, можно выделить лишь отдельные сферы:

- промышленная техника измерения и регулирования,
- робототехника,
- автомобилестроение,
- бытовая техника,
- медицинская техника.

Применимость того или иного датчика в этих сферах определяется прежде всего отношением цена/эффективность. При промышленном применении определяющим фактором является погрешность, которая при регулировании процессов должна составлять 1...2 %, а для задач контроля — 2...3 %. В этих случаях цены датчиков превышают 100 немецких марок ФРГ. Для специальных применений в области робототехники и медицинской техники цены датчиков могут достигать даже уровня 10...100 тыс. немецких марок ФРГ. Благодаря внедрению новых технологий изготовления (высоковакуумное напыление, распыление, химическое осаждение из газовой фазы, фотолитография и т. д.) и новых материалов непрерывно расширяются сферы применения датчиков, недоступные ранее из-за их высокой цены.

9.1. Датчики в промышленной технике измерений

Высокий спрос на промышленные датчики обусловлен прежде всего тем, что автоматизация приобретает все больший масштаб в производственных

процессах. Контроль и управление технологическим процессом с помощью вычислительной сети связи требуют множества детекторов, совместимых с микропроцессорами (рис. 9.1.1).

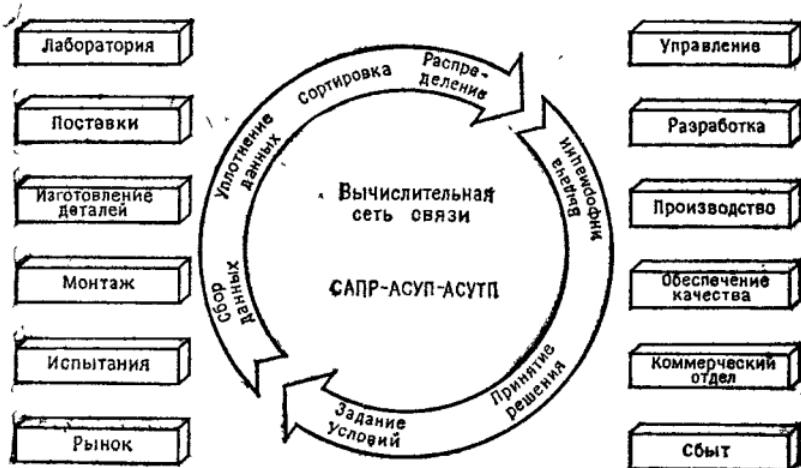


Рис. 9.1.1. Производственные этапы и схема автоматизации производства.

К стандартным применением в области промышленной техники измерений относятся:

- расход, количество,
- давление, разность давлений,,
- температура,
- уровень,
- химический состав.

Кроме этих стандартных датчиков все возрастающим спросом пользуются датчики новых типов, к которым относятся, например:

- датчики положения и перемещения,
- датчики изображения на ЛЭС, обработка изображения,
- оптические датчики, волоконно-оптические датчики,
- биодатчики (биотехнология),
- многокоординатные датчики (анализ шумов, распознавание образов).

Для современных производств характерна тенденция применения датчиков в интерактивном режиме, т. е. когда результаты измерений сразу же используются для регулирования процесса. Благодаря этому

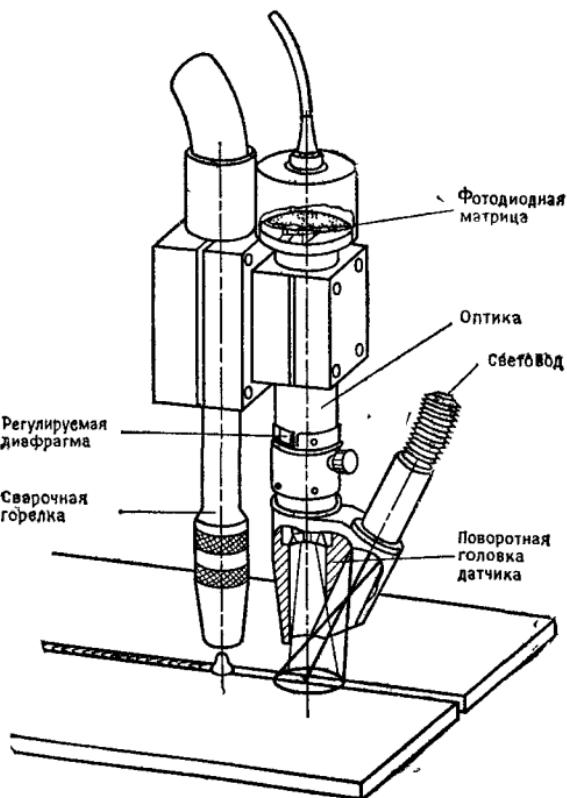


Рис. 9.1.2. Оптический датчик для управления процессом сварки в среде защитного газа.

в любой момент обеспечивается корректировка технологического процесса, что ведет к увеличению выхода продукции, а потому и к более рациональному производству. Естественно, такие датчики должны обладать исключительной надежностью, чтобы обеспечить непрерывный и бесперебойный режим работы.

Примером прямого управления технологическим процессом является показанный на рис. 9.1.2 датчик

для полностью автоматизированной или механизированной электродуговой сварки. Датчик работает по методу отражения падающего света. Отраженный свет создает на диодных цепочках (см. разд. 8.2 и 8.3) характерные для геометрии шва сигналы, которые обрабатываются с помощью микро-ЭВМ.

9.2. Датчики в робототехнике

Применение роботов непосредственно вытекает из показанных в разд. 9.1 задач по оптимизации технологии в промышленных производствах. В принципе

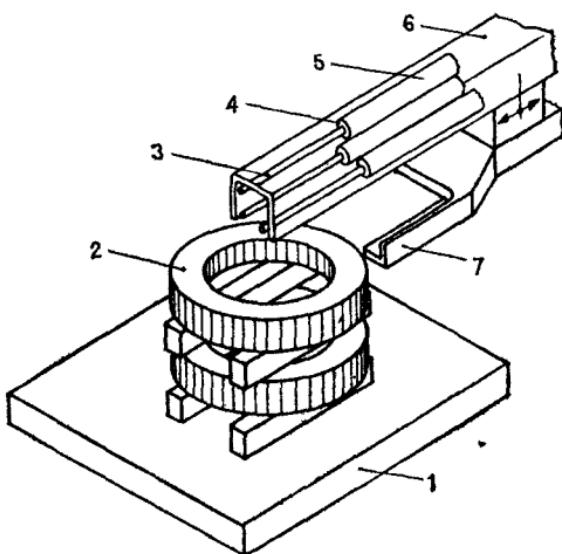


Рис. 9.2.1. Датчик манипулятора робота (на принципе D-поля): 1 — поддон; 2 — стопка шестерен; 3 — электроды; 4 — керамика («Рубалит 710»); 5 — стальная трубка с облицовкой из «Термакса»; 6 — экран («Термакс»); 7 — захват.

робот представляет собой не что иное, как сложную информационную систему (рис. 1.2.1), которая объединяет в себе получение, обработку и преобразование информации. При получении информации через датчики роботу требуется прежде всего способность «видеть» и «ощупывать».

Первое оказывается возможным благодаря оптическим датчикам (гл. 8), которые должны быть приспособлены к соответствующим задачам робота.

На рис. 9.2.1 показан датчик для распознавания контуров объекта (ощупывания) роботом в сложных условиях окружающей среды, как, например, в отжигательной печи при температуре около 1000°C датчик работает по методу измерения D- поля. Он состоит из

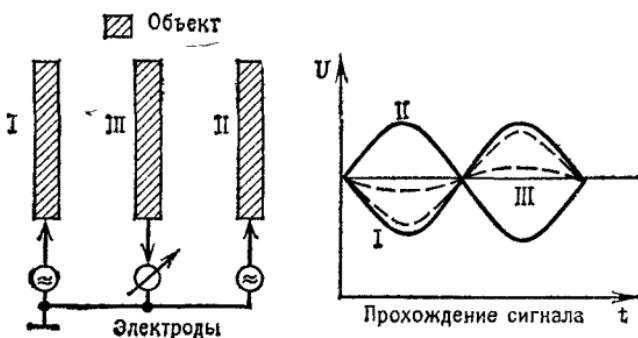


Рис. 9.2.2. Принцип действия датчика на основе измерения D- поля: выходной сигнал ± 10 В; опорный уровень регулируемый.

трех электродов («Термакс», $\varnothing 10$, $l=120$ мм), из которых два крайних формируют поле. На них подается в противофазе переменное напряжение (30 кГц, $N_{ss}=25$ В) (рис. 9.2.2). Средний электрод служит измерительным электродом и при отсутствии механических помех не воспринимает никакого сигнального напряжения.

Если между электродами I и III или III и II находится объект, то происходит изменение диэлектрической постоянной, которое сопровождается появлением переменного тока на измерительном электроде. Подключенный выпрямитель преобразует измеряемую величину в постоянное напряжение, знак которого зависит от положения объекта (между электродами I и III или III и II).

9.3. Датчики в автомобиле

Согласно проведенному анализу, западно-европейский рынок датчиков в 1985 г оценивался суммой около 1 млрд. немецких марок ФРГ, причем около 40 % этой суммы приходилось на автомобильные датчики. Такая аномально большая доля в общем рынке свидетельствует о значении, которое придается этому виду датчиков. Предельные цены, которые не должны превышаться для такого рода датчиков при погрешности измерений 1...3 % составляют примерно 10...15 немецких марок ФРГ.

К областям применения таких детекторов относятся:

- Датчики систем управления и регулирования привода, а также таких отдельных систем автомобиля, как рулевое управление, тормоза, электроника кузова.

- Датчики для обеспечения безопасности и надежности, например в системе защиты пассажиров, в системе блокировки и в противоугонной системе.

- Датчики диагностики и контроля расходных материалов, освещения, тормозов и системы охлаждения.

- Датчики для получения информации о расходе топлива, о наружной температуре и маршруте.

Физическими параметрами, измеряемыми с помощью этих датчиков, являются: температура, давление, скорость вращения, перемещение или угол, расход, усилие или момент, ускорение, влажность, парциальное давление (концентрация).

Требования, предъявляемые к указанным датчикам в отношении воздействия окружающей среды, чрезвычайно высоки, так как на чувствительные элементы могут влиять толчки, вибрации, нагрев, охлаждение, погодные условия, грязь, солевой туман и электрические помехи. Виды воздействий и возникающие в результате эффекты представлены в табл. 9.3.1 и 9.3.2.

При изготовлении датчиков для автомобильной электроники все в большей мере применяют совре-

Таблица 9.3.1

Воздействие окружающей среды	Типичное проявление
Температура (жара, холод)	Старение, охрупчивание
Колебания температуры	Усталость, образование трещин
Влажность воздуха (с образованием росы и тумана)	Короткие замыкания, поверхностная и контактная коррозия
Осадки (дождь, снег, гололед, иней)	Электролиз, разбухание
Давление (воздух, вода)	Функционирование
Песок, пыль	Короткие замыкания
Солнечное излучение	Старение, образование трещин
Агрессивные вещества (NaCl , SO_2 , H_2S)	Поверхностная и контактная коррозия
Плесень	Короткие замыкания

Таблица 9.3.2

Вещество	Воздействие
Солевой раствор, солевой туман (дорожная соль, морское побережье)	Электролиз, контактная и поверхностная коррозия
Диоксид серы (индустриальный климат)	Поверхностная коррозия
Аммиак	Межкристаллитная коррозия (латунь)
Влажность, конденсат	Утечки тока через короткие замыкания, уменьшение сопротивления изоляции
Топливные пары, топливо	Поверхностная коррозия, разбухание
Тормозная жидкость	Поверхностная коррозия, разбухание
Аккумуляторная кислота	Поверхностная и контактная коррозия
Двигательное масло	Разбухание

менные технологии, обеспечивающие экономичное изготовление датчиков минимальных размеров (табл. 9.3.3).

Таблица 9.3.3

Измеряемый параметр	Принцип действия датчика
Скорость вращения (число оборотов)	Гальваномагнитные эффекты (эффект Холла, магниторезистивный эффект), эффект Виганда, электромагнитная индукция
Перемещение, угол	Короткозамкнутое кольцо, короткозамкнутый дисковый датчик, потенциометр
Температура	Тонкослойные металлические датчики, полупроводниковый (кремниевый) датчик
Расход	Нагреваемая спираль или фольга, турбинное колесо (топливо), шариковый циркуляционный датчик
Давление	Пьезорезистивные полупроводниковые датчики давления, мембранные ячейки (с холловским сигналом, тонкослойные тензодатчики, емкостные датчики), толстослойные датчики давления
Момент	Магнитоупругий датчик (тордуктор), датчик, основанный на принципе вихревых токов, оптический датчик
Ускорение	Пружинно-инерционная система с тензодатчиками (фольга, тонкие слои), пьезоэлектрический датчик, пьезорезистивный полупроводниковый датчик (монолитный)
Концентрация кислорода	Диффузионный зонд из диоксида циркония

На рис. 9.3.1 показано принципиальное устройство чувствительного элемента датчика количества воздуха, предназначенного для применения в автомобиле. В данном случае речь идет о резистивном измерителе расхода (см. гл. 4), изготовленном методом пленочной технологии. Характеристика датчика при расходе воздуха от 0 до 100 л/с приведена на рис. 9.3.2.

Для уменьшения содержания в выхлопных газах оксидов азота и углерода все шире применяются

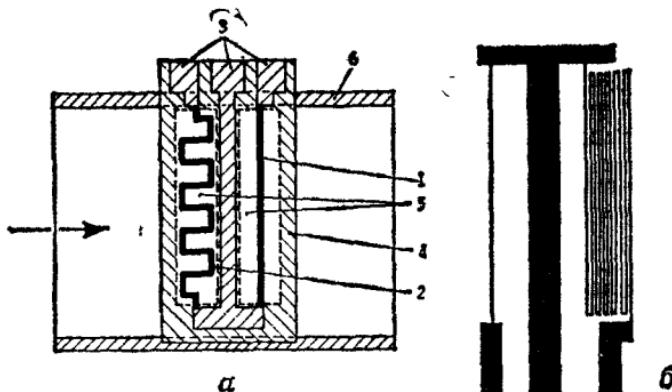


Рис. 9.3.1. Конструкция резистивного массового расходометра в тонкопленочном исполнении для измерения подачи воздуха в автомобиль (а) и пленочная структура измерительного и сравнительного (температура компенсации) резисторов (б): 1 — нагреваемый резистор; 2 — ненагреваемый резистор сравнения; 3 — цепи проводников и контактов; 4 — каркас с выемками (5); 6 — трубопровод. Элементы позиций 1—3 на полиимидной пленке.

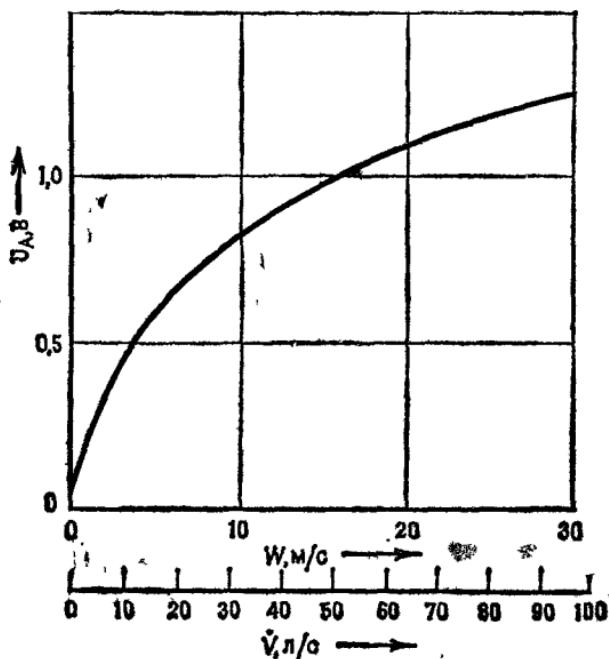


Рис. 9.3.2. Характеристика чувствительности датчика расхода.

катализаторы в сочетании с регулировкой воздушного числа λ . Это число определяет оптимальное соотношение топлива и воздуха в рабочей смеси, при котором происходит наиболее полное сгорание топлива и повышается эффективность действия катализатора.

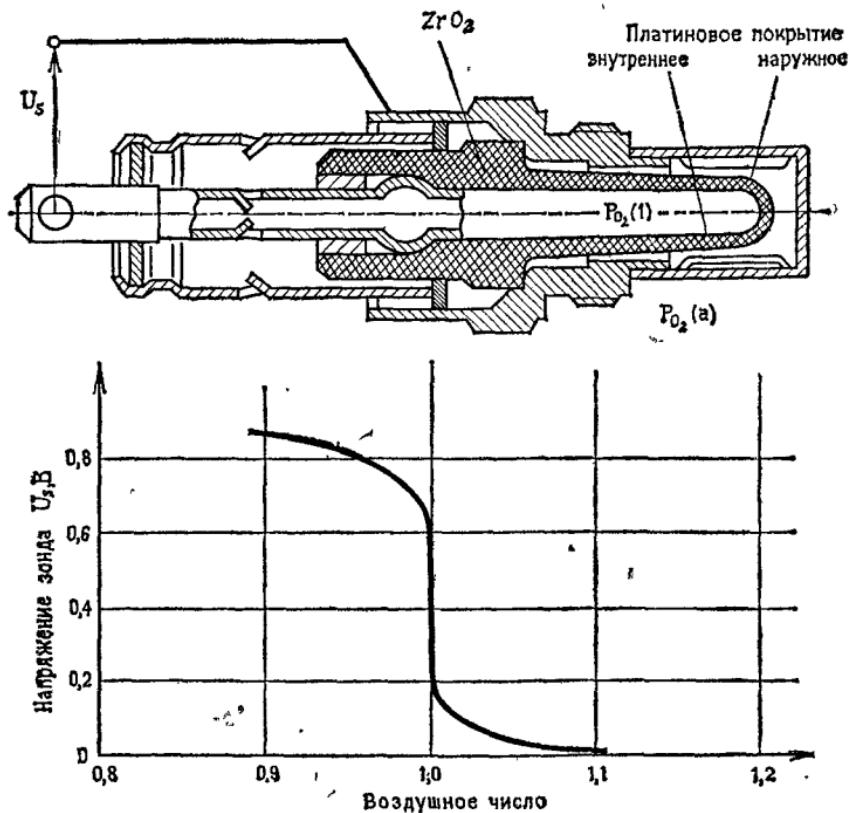


Рис. 9.3.3. Конструкция (вверху) и характеристика (внизу) λ -зонда фирмы Bosch: $P_{O_2}(1)$ — парциальное давление кислорода в окружающем воздухе; $P_{O_2}(a)$ — парциальное давление кислорода в выхлопных газах.

Для определения λ применяется диффузионный зонд на основе диоксида циркония, напряжение сигнала которого резко изменяется при $\lambda = 1$ (рис. 9.3.3).

Такой λ -датчик состоит из твердого электролита (ZrO_2), имеющего снаружи и изнутри платиновое покрытие, выполняющее роль электродов. Измеряемое

между этими электродами напряжение зонда зависит от разности парциальных давлений кислорода в окружающем воздухе (внутри зонда) и в выхлопных газах.

9.4. Датчики в бытовых приборах

В бытовой технике количество датчиков близко к числу применяемых в автомобильной электронике. Только в ФРГ в 1980 г. в выпущенных бытовых приборах было использовано около 18 млн. датчиков.

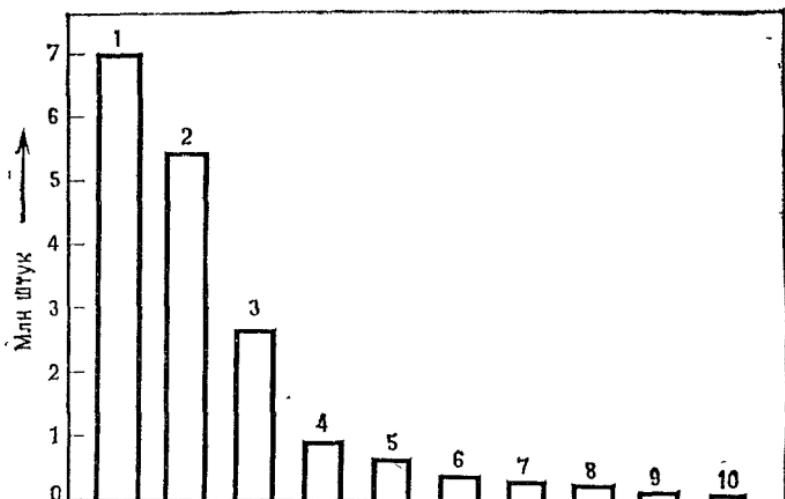


Рис. 9.4.1. Распределение датчиков по частоте применения в бытовых приборах: 1 — жидкостные регуляторы теплового расширения; 2 — биметаллические выключатели; 3 — датчики давления; 4 — терморезисторы с отрицательным ТКС; 5 — стержневые дилатометрические регуляторы; 6 — регуляторы потока; 7 — электромеханические датчики импульсов; 8 — датчики стиральных машин; 9 — резистивные датчики; 10 — датчики концентрации солевого раствора.

Распределение датчиков по частоте применения иллюстрируется гистограммой на рис. 9.4.1. Наибольшая доля в указанном ассортименте приходится на жидкостные регуляторы теплового расширения (температура), биметаллические переключатели (температура) и датчики давления,

В табл. 9.4.1—9.4.6 представлены некоторые измеряемые параметры и типы датчиков для различных бытовых приборов.

Кроме этих обычных чувствительных элементов и датчиков, в бытовых приборах все более широко применяются самые современные датчики, позволяющие, например, оценивать степень готовности или уровень обжаривания жаркого.

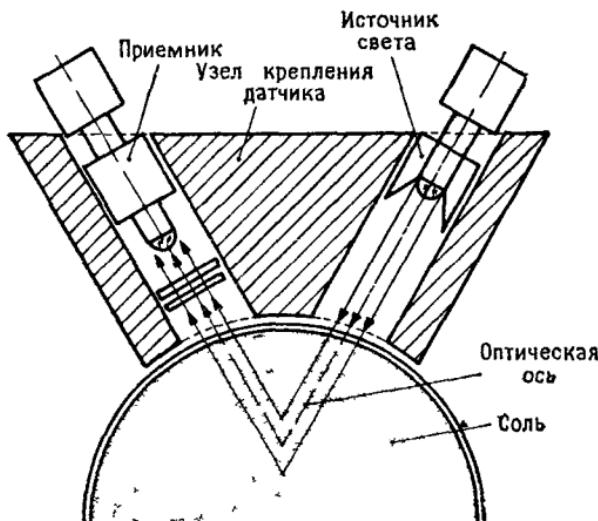


Рис. 9.4.2. Оptический датчик для определения концентрации солей в растворе (посудомоечная машина).

На рис. 9.4.2 изображен современный датчик концентрации солей (моющих средств) в установках для мытья посуды. Он состоит из источника света ($\lambda_0 = 950$ нм) и детектора (приемника), расположенного под углом около 90° к оптической оси источника. При достаточном уровне содержания моющих средств испускаемое источником ИК-излучение рассеивается на кристаллах соли и частично отражается в сторону детектора. Если же содержание этих солей мало, то сигнал исчезает, так как солевой раствор поглощает излучение.

Таблица 9.4.1

Электропечь

Регулируемый параметр	Принцип действия датчика	Назначение
Температура	Расширение жидкости	Регулирование температуры духовки; регулирование температуры дна кастрюли при использовании электроплитки
То же	Удлинение стержня	Регулирование температуры при опаливании
»	Биметалл	Включение вентилятора при слишком высокой температуре в помещении
»	Платиновый тонкослойный плоский измерительный резистор	Регулирование температуры в духовке

Таблица 9.4.2

Посудомоечная машина

Регулируемый параметр	Принцип действия датчика	Назначение
Температура	Биметалл	Регулирование температуры воды
	Терморезистор с отрицательным ТКС	Регулирование температуры воды
Уровень	Реле давления	Ограничение количества воды

Таблица 9.4.3

Стиральный автомат

Регулируемый параметр	Принцип действия датчика	Назначение
Температура	Расширение жидкости, биметалл, терморезистор с отрицательным ТКС	Регулирование температуры щелочного раствора
Уровень	Реле давления, электронный датчик давления	Регулирование уровня щелочного раствора
Скорость вращения	Характеризатор, электромеханический датчик импульсов	Регулирование числа оборотов электродвигателя

Таблица 9.4.4

Электропечь

Входной параметр	Измеряемые параметры	Принцип действия датчика
Степень готовности блюда	Изменение окраски индикаторов	Детектор излучения для распознавания цвета
	Диэлектрическая проницаемость	Расположение приготовляемого блюда между обкладками конденсатора
Уровень обжаренности	Окисляемые газы	Датчик на основе SnO_2
	Излучение поверхности	Детектор излучения для распознавания цвета
Влажность	Емкость	Полимерная пленка с золотым слоем
	Электрическое сопротивление	Пористые оксиды металлов
Температура	Излучение поверхности	Детектор ИК-излучения

Таблица 9.4.5.

Стиральный автомат

Входной параметр	Измеряемые параметры	Принцип действия датчика
Жесткость воды	Электропроводность	Электроды в потоке
	Отношение концентрации ионов Ca/Mg	Ионно-селективный полевой транзистор (Ca^{2+})
Уровень воды	Эквипотенциальное поле	Постоянный ток через низкоомный проводник
Масса воды	Импульс	Оптоэлектронная регистрация времени работы крыльчатки

Продолжение табл. 9.4.5

Входной параметр	Измеряемые параметры	Принцип действия датчика
Масса белья	Пусковой ток электродвигателя	Амперметр с реле времени
Остаточная щелочность	Разница в электропроводности по сравнению с водопроводной водой	Измерение электропроводности в потоке
Остаточное содержание поверхностно-активных веществ	Измерение концентрации ионов Na^+	Ионно-селективный полевой транзистор (Na^+)
	Прозрачность	Оптоэлектронное измерение интенсивности проходящего света

Таблица 9.4.6

Холодильные и морозильные камеры

Входной параметр	Измеряемые параметры	Принцип действия датчика
Нарост инея	Рассеянный свет	Светоизлучающий диод/фототранзистор
Влажность	Емкость	Полимерная пленка с золотым слоем
	Электрическое сопротивление	Пористые оксиды металлов
	Частота	Керамический вибратор
Давление хладоагента	Электрическое сопротивление	Пьезорезистивный датчик давления на основе кремниевого кристалла

ЛИТЕРАТУРА

К главе 1

1. Mikrocomputer-Peripherik, Siemens Druckschrift Nr. B/2316.
2. Wiegbleb G. Sensoren und ihre Anwendung — Auf dem Weg zum Vollautomaten, Funkschau (1984), Heft 8, Seite 37.

К главе 2

1. Thermistor-Application Notes AN-1A, Fenwal-Electro. Limited.
2. Heiß- und Kaltleiter für die Kraftfahrzeugelektronik, Siemens Druckschrift Nr. B/2823 (1984).
3. Practical Temperature Measurements, Hewlett-Packard Application Note 290, August 1980.
4. Diehl W. Platin-Dünnenschicht-Widerstände als genaue und stabile Temperatur-Sensoren. Degussa Druckschrift Nr. 8202 (1982).
5. Wiegbleb G. Hochgenaue Temperatur- und Temperaturdifferenzmessungen mit einfachen Mitteln. PdN-Physik, 1981, Heft 9, Seite 281—284.
6. Temperaturmessungen mit Widerstandsthermometern. Heraeus Druckschrift Nr. TM-W1.
7. Thermoelemente-Internationale Grundwertreihen nach IEC 584-1, Degussa Prospekt Nr. 8006.

К главе 3

1. Pressure Transduser Handbook 1983, SENSORTEC GmbH.
2. Heincke H. Piezoresistive Drucksensoren. «und-oder-nor+steuerungstechnik» 11, 1983, Seite 27—28.
3. Ehrler G. Nagy G. Silizium-Drucksensoren. Elektronikpraxis 18, 1983, Seite 30—33.

К главе 4

1. Hogrefe W. Auswahlkriterien für Durchflußmeßgeräte. Regeltechnische Praxis, Heft 9/11/12 (1982).
2. Baier W. Anwendung selbstgeheizter Kaltleiter zur Durchflussmessung, NTC-Fachberichte, Band 79 (1982).
3. Wiegbleb G. Mittel und Methoden für das Messen des Gasdurchflusses, Maschinenmarkt 90 (1984), 7.

К главе 5

1. Wiegble G. Gasanalyse nach dem Wärmeleitverfahren. PdN-Chemie 9/1980.
2. Scholz E. Abgas-Schnüffler, ELO 2/1983.
3. Knobloch W. Der Anti-Flensburg, ELO 9/1981.
4. Karthaus H. Physikalische Gasanalyse. Druckschrift L3410, Hartmann + Braun AG, Frankfurt.

К главе 6

1. Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchte, VALVO-Technische Information Nr. 790423.
2. Walz G. Feuchtemeßschaltung, Elektronik Journal 7/1984.

К главе 7

1. Boll R. und Borek L. Magnetic Sensors, Siemens Forsch.- und Entwicklungs-Ber., Bd. 10 (1981), Nr. 2.
2. Dibbern U. Magnetoresistive Sensoren und ihre Anwendung. Industrie-elektrik u. elektronik, 28. Jg. (1983), Nr. 6.
3. Küers G. Theorie und Praxis der Wiegand-Sensoren. Der Konstrukteur, März 1983.

К главе 8

1. Detektor aus Silizium. industrie-elektrik u. elektronik. 28, Jg. (1983), Nr. 8.
2. Raab H. Optische Sensoren in der chemischen Betriebsmeßtechnik. Technisches Messen 50 (1983), Heft 12.
3. Marguerre H. Messen und prüfen mit optischen Sensoren. Regelungstechnische Praxis 26 (1984), Heft 2.
4. Dümlein A. Optische Datenerfassung mit CCD-Kameras. ELEKTRONIK 25/17.12.1982, S. 89.
5. Bergemann H. CCD-Bildsensoren, die neuen Augen der Roboter. ELEKTRONIK 12/16.6.1983, Seite 74.

К главе 9

1. Bethe K. Zur Situation auf dem Sensor Markt. Regelungstechnische Praxis 26 (1984), Heft 2, Seite 51.
2. Peinke W. Betrachtungen zur Genauigkeit von Betriebsmeßgeräten. Regelungstechnische Praxis 24 (1982), Heft 5, Seite 175.
3. Nentwig K. Sensoren für die chemische Industrie. CAV 1984, April, Seite 35.
4. Fischer P. H. K. Sensoren in Hausgeräten. NTG-Fachberichte, Bd. 79 (1982), Seite 17.
5. Heintz F. Sensoren in Kraftfahrzeugen.
6. Zabler E. NTG-Fachberichte, Bd. 79 (1982), Seite 25.

Журналы, регулярно публикующие материалы по современному состоянию техники датчиков:
Technisches Messen, Oldenbourg-Verlag in München

Elektronik, Franzis-Verlag in München
Funkschau, Franzis-Verlag in München
Regelungstechnische Praxis, Oldenbourg-Verlag in München
industrie-elektrik + elektronik, Hüthig Verlag in Heidelberg
Sensor Review, IFS-Publications in Bedford (England)
VDI-Nachrichten, VDI-Verlag in Düsseldorf
VDI-Berichte, VDI-Verlag in Düsseldorf
Sensors and Actuators, Elseviers Sequoia in Lausanne (Schweiz)
Messen Prüfen Automatisieren, Holzmann-Verlag in Bad Wörishofen

СПИСОК ФИРМ — ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ

Данный перечень не претендует на полноту и отражает
состояние на 1984—1985 гг.

Фирма-изготовитель	Производимая продукция
<i>Endrich GmbH,</i> г. Нагольд	Обширный ассортимент датчиков всех видов (датчики звуковые, влажности, магнитного поля, газовые, дыма, температуры и т. д.)
<i>TAD-Sensorik,</i> г. Штутгарт	Электронные датчики, извещатели повышенной температуры, сигнализаторы уровня
<i>Hottlinger + Baldwin,</i> г. Дармштадт	Тензодатчики, электронные блоки к датчикам, датчики перемещения, давления, усилия
<i>Siemens AG</i>	Микро-ЭВМ, периферийные устройства, комплексные системы датчик — ЭВМ — исполнительное устройство
<i>Panametrics,</i> г. Висбаден	Датчики влажности, толщиномеры, газовые датчики
<i>Jumo GmbH,</i> г. Фульда	Распространенные чувствительные элементы, приборы измерения давления, датчики температуры
<i>Delta GmbH,</i> г. Мюнхен	Датчики давления
<i>Telefunken</i>	Датчики давления
<i>Leybold-Heraeus,</i> г. Ханау	Оборудование и технология изготовления датчиков, датчики расхода, газовые датчики, вакуумметры

П р о д о л ж е н и е

Фирма изготовитель	Производимая продукция
<i>Doduco GmbH,</i> г. Пфорцхайм	Датчики магнитного поля, датчики Виганда, технология изготовления датчиков
<i>Dr. R. Seitner GmbH,</i> г. Геншинг	Датчики усилия, оптические датчики, дозаторы сока
<i>Hohner KG</i> г. Тутлинген	Датчики приращения, датчики угла поворота
<i>Höntsch GmbH</i> г. Вайблинген	Датчики расхода, температуры, давления
<i>Testoterm GmbH</i> г. Ленцкирх	Датчики расхода, температуры
<i>Honsberg KG,</i> г. Ремшайд	Датчики расхода, температуры, уровня, давления
<i>Endres + Hauser,</i> г. Маульбург	Датчики расхода, влажности
<i>Valvo GmbH,</i> г. Гамбург	Датчики изображения, оптические датчики, датчики температуры
<i>Techmark GmbH,</i> г. Мюнхен	Датчики теплового потока, температуры, давления, расхода
<i>Degussa AG,</i> г. Ханау	Датчики температуры, расхода, термопары
<i>Gerätebau GmbH,</i> г. Дортмунд	Газовые датчики, датчики расхода
<i>Figaro Inc.,</i> г. Осака, Япония	Газовые датчики
<i>BBC—AG,</i> г. Франкенталь	λ-зонды, газовые датчики
<i>Heraeus GmbH,</i> г. Ханау	Датчики температуры, термопары
<i>Fenwal, Inc.</i> г. Фреймингем, США	Терморезисторы (комплексная программа)
<i>Namatatsu,</i> г. Инчино, Япония	Оптические датчики (комплексная программа)
<i>Infrared-Industries,</i> г. Уолтем, США	Датчики ИК-излучения, монохроматические датчики
<i>Texas-Instrum.,</i> г. Фрайзинг	Датчики температуры, давления, ускорения, холловские датчики

Продолжение

Фирма-изготовитель	Производимая продукция
<i>Ziegler GmbH, г. Мёнхенгладбах</i>	Датчики давления, вычислительная техника
<i>Natec GmbH, г. Гархинг</i>	Приборы измерения давления, расходомеры, приборы для измерения и калибровки
<i>Airflow Lufttechnik, г. Райнбах</i>	Датчики давления, микроманометры, датчики потока
<i>Honeywell GmbH, г. Оффенбах</i>	Пьезорезистивные датчики давления с интегральными электронными схемами, реле близости, фотоячейки, холловские датчики
<i>E. Halstrup GmbH, г. Кирхцартен</i>	Датчики давления, индуктивные датчики перемещения, измерительные электронные приборы, исполнительные механизмы
<i>Keller AG, г. Винтертур</i>	Датчики давления, электронные блоки к датчикам
<i>Althen GmbH, г. Кельхайм</i>	Обширный ассортимент датчиков всех видов, измерительные электронные приборы
<i>Kulite GmbH, г. Гофхайм</i>	Тензодатчики, датчики усилия, давления
<i>Medas GmbH, г. Лайхлинген</i>	Датчики давления, измерительные усилители, измерители уровня
<i>E-T-A GmbH, г. Альтдорф</i>	Датчики давления, регуляторы потока
<i>Philips GmbH, г. Кассель</i>	Датчики давления, температуры, термопары
<i>Thomson-CSF, г. Булонь, Франция</i>	Датчики изображения (комплексная программа)
<i>Sensoric GmbH, г. Эссен</i>	Датчики близости, волоконно-оптические датчики
<i>Oriel GmbH, г. Дармштадт</i>	Волоконно-оптические датчики
<i>Polytec GmbH, г. Вальдброн</i>	Волоконно-оптические датчики температуры
<i>ASEA, г. Фридберг</i>	Волоконно-оптические датчики температуры
<i>Kistler AG, г. Винтертур</i>	Пьезоэлектрические датчики, измерительные электронные приборы