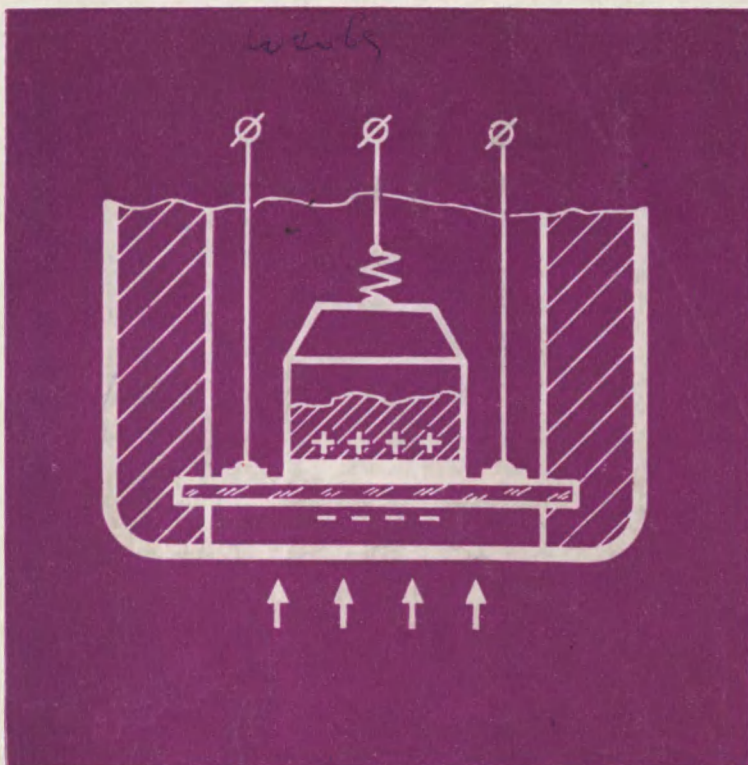




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Л. А. ОСИПОВИЧ

ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



БИБЛИОТЕКА ПРИВОРОСТРОИТЕЛЯ



Л. А. ОСИПОВИЧ

ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1979



Scan AAW

ББК 34.9
О 74
УДК 681.325

Осипович Л. А.

О 74 Датчики физических величин. — М.: Машиностроение, 1979. — 159 с., с ил. — (Б-ка приборостроителя).
50 к.

В книге изложены основы проектирования малогабаритных и миниатюрных датчиков физических величин (механического напряжения, давления, расхода, параметров вибраций и т. д.), преобразуемых в силу или перемещение, а также датчиков температуры; приведены характеристики новых типов упругих и чувствительных элементов; рассмотрены теоретические предпосылки построения, расчеты, конструктивные и технологические особенности датчиков, а также описаны типовые электрические схемы их включения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием средств преобразования первичной информации, а также автоматизацией технологических процессов в различных отраслях промышленности.

О $\frac{31305-275}{038(01)-79}$ 275-79. 2706000000

ББК 34.9
6П5.8

© Издательство «Машиностроение», 1979 г.

Датчики являются основными элементами измерительно-информационных и управляющих систем и в значительной степени определяют точность измерения параметров и надежность системы в целом.

Разработка новых высокопроизводительных технологических производственных процессов и их автоматизация требуют создания ряда датчиков с высокими метрологическими характеристиками.

За последние годы в нашей стране изданы книги, посвященные вопросам теории датчиков. К ним относятся работы Л. А. Островского [73], А. М. Азизова и А. Н. Гордова [2], известная книга А. М. Туричина, книга под редакцией П. В. Новицкого [110], работа В. В. Логинова [37] и др.

Особо надо отметить фундаментальную книгу Д. И. Агейкина, Е. Н. Костиной и Н. Н. Кузнецовой «Датчики контроля и регулирования» [1], содержащую обширный справочный материал по датчикам отечественного и зарубежного производства.

Однако выпуск литературы, посвященной проектированию современных датчиков, ограничен.

В данной книге изложены основы проектирования малогабаритных и миниатюрных датчиков физических величин (механическое напряжение, давление, расход, параметры вибраций и т. д.), преобразуемых в силу или перемещение, а также датчиков температуры. Особое внимание уделено системному методу проектирования датчиков, главное условие которого заключается в возможности измерения различных физических величин однотипными миниатюрными высокочувствительными элементами, дающими стандартный выходной электрический сигнал.

Все типы рассматриваемых датчиков преобразуют измеряемый параметр в электрический сигнал. Гидравлические, пневматические датчики и элементы пневмоники в книге не описаны.

Приводятся характеристики новых типов упругих и чувствительных элементов. Даны теоретические предпосылки, расчеты, конструктивные и технологические особенности датчиков, а также их основные параметры. Представлен справочный материал по специальным сплавам, неметаллическим материалам и новым неразъемным соединениям (пайка галлиевыми сплавами, рельефная сварка и т. д.). Описаны типичные электрические схемы включения датчиков.

При составлении книги использовались разработки автора и материалы периодической печати.

Все замечания по содержанию книги направлять по адресу: 107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., д. 3, изд-во «Машиностроение».

1. ОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯХ И КЛАССИФИКАЦИИ ДАТЧИКОВ

Большинство исследователей относят к датчикам специальные устройства для преобразования одного вида энергии физического процесса в другой вид энергии (обычно электрический). Р. Стэси [90], Е. Б. Бабский [7] отождествляют понятие датчик с преобразователем. Причем датчики, в которых электрический сигнал возникает непосредственно в результате воздействия измеряемого параметра, без промежуточного преобразования, Р. Стэси относит к первичным преобразователям.

По Д. Н. Меницкому [40] и А. М. Туричину [95], к датчикам относятся все основные узлы электрической схемы для измерения неэлектрических величин, расположенные непосредственно у объекта.

К. Мэшин [45] называет датчиками устройства, в которых величины одного типа преобразуются в эквивалентные величины другого типа.

Ю. И. Иориш [27] разделяет датчики электродистанционной измерительной аппаратуры на два класса — генераторные и параметрические. Ч. С. Дрейпер [21] относит датчики к преобразователям (передающим звеньям), стоящим на входе измерительной системы, связывает классификацию преобразователей с потоком энергии и разделяет их на пассивные и активные.

Пассивный преобразователь воспринимает входной сигнал, связанный с энергией какой-либо системы, и передает ее через свой выход, связанный с этой энергией (которая уменьшается вследствие потерь внутри преобразователя), второй системе.

В английской технической литературе такой тип преобразователя называется трансдуктором.

Активный преобразователь получает вспомогательную энергию от питающей системы. Эта энергия подается через выход на приемную систему, причем изменения на выходе определяются изменениями входа.

По этой классификации генераторные преобразователи (датчики) относятся к пассивным, а параметрические преобразователи (датчики) — к активным.

Однако для измерительных систем и их элементов — датчиков основным является передача информации с минимальными погрешностями, импульсы энергии являются только носителями информации.

Классификация датчиков физических величин, так же как электроизмерительных приборов и датчиков в целом представляет ряд

трудностей. Практически невозможно охватить в рамках классификации все существующее многообразие датчиков физических величин измерительно-информационных систем.

Наиболее целесообразно классифицировать датчики по основным признакам — назначению, характеру применения, типу параметра измерений и т. д. [27].

Представляется целесообразным следующее определение датчика. Датчиком измерительно-информационной системы (комплекса) называют конструктивную совокупность одного или нескольких измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерений и преобразующих измеряемые (контролируемые) параметры в величины, удобные для передачи по каналам связи и дальнейшего преобразования.

2. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ДАТЧИКОВ

К датчикам физических величин, преобразующих измеряемый параметр в электрический сигнал, применимы теоретические основы, изложенные в фундаментальных трудах Б. С. Сотскова [89], Ч. С. Дрейпера и др. [21], А. М. Туричина [95], Д. И. Агейкина и др. [1], Ю. И. Иориша [27], Л. А. Островского [73] и др. Ниже дается обобщение некоторых определений, характеризующих общие свойства датчиков.

На датчик могут одновременно воздействовать различные физические величины (давление, температура, влажность, вибрация, ядерная радиация, магнитные и электрические поля и т. д.), но воспринимать он должен только одну величину, называемую естественной измеряемой величиной A .

Функциональную зависимость выходной величины B датчика от естественной измеряемой величины A в статических условиях, выраженную аналитически, таблично или графически, называют статической характеристикой датчика.

Статическая чувствительность представляет собой отношение малых приращений выходной величины к соответствующим малым приращениям входной величины в статических условиях. По определению, статическая чувствительность равна $S = \frac{\Delta B}{\Delta A}$ или, переходя к пределу, будем иметь

$$S = \frac{dB}{dA} . \quad (1)$$

Это соотношение является постоянным, когда выходная величина (выходной сигнал) представляет собой линейную функцию входной величины (входного сигнала). Если имеется нелинейная функция, то должны быть указаны точки, к которым относится данная чувствительность. В некоторых случаях чувствительность может быть представлена в виде наклона секущей между двумя характеристическими точками статической нелинейной характеристики.

Понятие статической чувствительности аналогично понятию коэффициента усиления; градиента; коэффициента чувствительности.

Чувствительность датчика — это, как правило, именованная величина с разнообразной размерностью, зависящей от природы входной и выходной величин. Например, для датчика давления

крови размерностью чувствительности является отношение мкВ/мм рт. ст. и т. д.

Понятие чувствительности можно распространить на динамические условия работы. При этом под чувствительностью подразумевают отношение скорости изменения выходного сигнала к соответствующей скорости изменения входного сигнала:

$$S_d = \frac{dB/dt}{dA/dt} . \quad (2)$$

В случае периодических, в частности синусоидальных, сигналов чувствительность может быть определена как отношение амплитуд выхода и входа.

Под порогом чувствительности датчика понимают минимальное изменение измеряемой величины (входного сигнала), вызывающее изменение выходного сигнала. Наиболее характерным показателем качества датчика является полный диапазон датчика, выражаемый отношением

$$D_d = \frac{X_n}{\Delta_0} , \quad (3)$$

где X_n — естественный предел измерения; Δ_0 — порог чувствительности датчика.

Для каждого типа датчиков существует практически достижимый предел величины D_d , определяемый принципом действия датчика и характеристиками чувствительного элемента.

Гистерезисом называют неоднозначность хода статической характеристики датчика при увеличении и уменьшении входной величины.

Для упругих элементов (мембраны, сильфоны, пружины и т. д.) в понятие гистерезис также включают понятие упругое последействие.

Гистерезис относится в общем случае к случайным погрешностям, так как его величина определяется не только значениями входной величины, но и временными характеристиками работы датчика. Гистерезис выражается в процентах

$$\delta_r = \frac{\Delta B_r}{B_{\max} - B_{\min}} 100\% , \quad (4)$$

где $B_{\max} - B_{\min}$ — изменение выходной величины в рабочих пределах.

Гистерезис возникает в датчиках из-за внутреннего трения в упругих элементах, трения в подвижных элементах, ползучести (например, в наклеиваемых тензодатчиках), магнитного гистерезиса и т. п.

Основной погрешностью датчика является максимальная разность между действительным значением выходного сигнала и его величиной, соответствующей истинному значению входного параметра. Эта разность определяется по статической характеристике датчика при нормальных условиях и обычно относится к разности предельных значений выходной величины:

$$\delta = \frac{\delta_B}{B_{\max} - B_{\min}} 100\% . \quad (5)$$

Нормальными условиями эксплуатации датчика являются: температура окружающей среды $+25 \pm 10^\circ\text{C}$; атмосферное давление $10^5 \pm 40\,000$ Па/750 ± 30 мм рт. ст./; относительная влажность окружающего воздуха $65 \pm 15\%$; отсутствие вибрации и полей, кроме гравитационного.

Дополнительные погрешности датчика — это погрешности, вызываемые изменением внешних условий по сравнению с нормальными. Они выражаются в процентах, отнесенных к изменению неизменяемого параметра (например, температурная погрешность 1% на 5°C ; погрешность от магнитного поля 0,5% на 5Э и т. д.).

Первичной погрешностью датчика называют отклонение его параметра от расчетного значения:

$$\delta P_{ij} = P_{ij} - (P_{ij})_0, \quad (6)$$

где δP_{ij} — первичная погрешность параметра P_{ij} ; $(P_{ij})_0$ — расчетное значение параметра P_{ij} ; i — индекс (номер) преобразователя; j — индекс (номер) параметра.

Первичная погрешность δP_{ij} датчика вызывает отклонение выходной величины B_i от ее расчетного значения при заданном значении входной величины A_i . Это отклонение принято называть частной погрешностью датчика:

$$\delta B_{ij} = \frac{\partial B_i}{\partial P_{ij}} \delta P_{ij}; \quad (7)$$

$$B_i = f_i [A_i, (P_{i1})_0, (P_{i2})_0, \dots, (P_{in})_0]. \quad (8)$$

Суммарная погрешность датчика определяется как сумма частных погрешностей. Способ суммирования определяется природой первичных погрешностей.

При систематических первичных погрешностях частная погрешность датчика определяется по зависимости

$$\delta B_i = \delta B_{i1} + \delta B_{i2} + \dots + \delta B_{in}. \quad (9)$$

Если первичные погрешности случайные, то предельное значение погрешности датчика можно определить квадратичным суммированием предельных значений частных погрешностей:

$$\Delta B_i = \pm \sqrt{(\Delta B_{i1})^2 + (\Delta B_{i2})^2 + \dots + (\Delta B_{in})^2}. \quad (10)$$

Практическая оценка погрешности измерений различных физических параметров часто усложняется большим числом одновременно действующих независимых факторов, вызывающих частные погрешности. В качестве примера рассмотрим измерение давления крови. Здесь имеем следующие группы основных независимых факторов, вносящих наиболее значительные погрешности измерений:

1) погрешность, вносимая нелинейностью амплитудной характеристики канала давления из-за несоответствия условий калибровки аппаратуры и условий ее применения на практике (по температуре окружающей среды, давлению воздуха, наводкам и пр.), $\Delta B_1 = \pm 5\%$;

2) погрешность, вносимая непрямолинейностью амплитудно-частотной характеристики и неправильностью при ее снятии, $\Delta B_2 = 5\%$.

3) погрешность за счет дрейфа нуля $\Delta B_3 \approx 3\%$;

4) погрешность, вносимая при обработке кривой записи давления, $\Delta B_4 \approx 5\%$.

Таблица 1

**Погрешности, вносимые элементами канала
измерения давления крови**

Элементы аппаратуры	Частные погрешности по паспортным (фирменным) данным, %
Узел ввода давления среды (катетер, измерительная стойка и т. д.)	± 3
Датчик	± 5
Усилитель	± 2
Регистрирующее и анализирующее устройство	± 4
Предельная погрешность . .	± 14

Все эти погрешности представляют собой предельные значения соответствующих систематических погрешностей для данной аппаратуры и данного эксперимента. Сложность заключается в том, что численные значения этих погрешностей, как правило, неизвестны. Однако даже если они и известны, то дать общую оценку точности измерений давления крови одной цифрой весьма затруднительно.

Если измерения производятся различными экземплярами одинаковой аппаратуры, то допустимо перевести систематические погрешности δV_i в класс случайных, тогда можно воспользоваться указанным правилом сложения предельных значений частных погрешностей. Для рассматриваемого примера получим

$$\Delta_{\text{изм}} = \pm \sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 5^2} \approx 9\%.$$

Вероятная погрешность измерения $\rho_{\text{изм}} = \Delta_{\text{изм}}/4,5$ (половина производимых измерений имеет погрешности меньше этой величины) [27]. Тогда $\rho_{\text{изм}} = 2\%$. С возрастанием числа измерений переменных величин увеличивается и общее число погрешностей, с которыми приходится сталкиваться экспериментатору. В связи с этим для общей оценки результатов измерений преимущественное значение имеет предельная погрешность $\Delta_{\text{изм}}$.

Известен другой способ суммирования частных погрешностей. Так, например, в работе [40] дана ссылка на возможность введения частных погрешностей не по факторам, вызывающим погрешности, а по элементам аппаратуры измерительного устройства.

Здесь суммируются абсолютные значения частных погрешностей по паспортным данным. В табл. 1 дан пример такого сложения.

Как видно, этот способ приводит также к большим значениям предельной погрешности.

Динамическая характеристика датчика определяет параметр выходной величины при быстрых¹ изменениях входной величины.

¹ В приборостроении под быстрым изменением входной величины обычно понимают физический процесс при $f_{\text{вх}} > 5 \div 10$ Гц.

Динамическая характеристика зависит от метода измерений и внутренних свойств элементов датчика. Она может задаваться различными зависимостями:

1) переходной характеристикой $B=f(t)$, где t — время скачкообразного изменения входной величины, A ;

2) частотной характеристикой $S_d=F(f_{вх})$ — зависимостью чувствительности датчика от частоты изменения входного сигнала;

3) фазовой характеристикой — зависимостью сдвига фаз между векторами входной и выходной величины от частоты синусоидального изменения входной величины.

3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКАМ

В целом датчики физических величин, преобразующие измеряемые параметры в выходной электрический сигнал, должны разрабатываться в соответствии с ГОСТом. Конструкция и исполнение датчиков должны удовлетворять ряду специальных требований, которые в значительной степени определяются средой, окружающей датчик в рабочих условиях. Например, датчики, контактирующие с человеком, не должны раздражать живой организм.

Датчики, работающие в бортовых условиях, должны быть стойкими к вибрации. Во всех случаях должна обеспечиваться безопасность обслуживающего персонала от поражения электрическим током.

В настоящее время отсутствует единая международная терминология не только по датчикам физических величин в целом, но и по отдельным классам датчиков (например, по датчикам давления). Это затрудняет сравнительный анализ характеристик датчиков различных фирм. К датчикам физических величин могут быть предъявлены самые разнообразные требования, определяемые условиями их применения.

Основные требования следующие: 1) отсутствие воздействий на функционирование организма человека; 2) необходимые чувствительность и точность; 3) высокая перегрузочная способность (отношение предельного допустимого значения входной величины к номинальному ее значению); 4) устойчивость к химическим и биологическим воздействиям измеряемой и окружающей сред; 5) направленность действия (малое влияние нагрузки в выходной цепи датчика на режим входной цепи); 6) малая чувствительность к неизмеряемым параметрам и компонентам полей (электрических, магнитных, гравитационных, радиационных и др.); 7) унифицированность и взаимозаменяемость; 8) малая масса и габаритные размеры; 9) экономичность и технологичность производства.

4. НАДЕЖНОСТЬ И ВОПРОСЫ МИНИАТЮРИЗАЦИИ

Конструкции датчиков постоянно усложняются. Имеется тенденция размещения большого числа деталей в ограниченных объемах. В то же время требования к надежности и увеличению срока службы датчиков неуклонно возрастают. Имеется также ряд классов датчиков, к которым предъявляются требования особо высокой надежности. Это датчики автоматических систем летательных аппаратов, датчики контроля и регулирования в атомной энергетике, датчики для биомедицинских исследований и др.

В последние годы были проведены экспериментальные исследования по отработке методики определения срока службы отдельных деталей и конструкций. При этом сопоставляемые результаты получают при испытаниях в течение одинакового времени и при равнозначных внешних условиях. На основании опытов можно установить вероятность того, что данная деталь или элемент через определенное число часов работы еще сохранит работоспособность. Имея характеристики надежности отдельных деталей, можно определить вероятный срок службы датчика в целом. Сроком службы при этом называют ожидаемое время работы до первого повреждения.

Ниже приведены сроки службы в часах для некоторых датчиков и конструкций.

Малогабаритные реостатные датчики давления . . .	1000
Емкостные датчики давления	3000
Пьезоэлектрические преобразователи	3500
Вибраторы	1500
Быстродействующие реле	2000
Шаговые двигатели	1000

Экспериментально установлено, что вероятность повреждений увеличивается с ростом числа установленных в приборе деталей по экспоненциальному закону.

Результаты анализа причин повреждений датчиков в процентах следующие:

Неправильное проектирование (неудачная конструкция, неправильный выбор чувствительных элементов и материалов и др.)	35
Неправильная эксплуатация	30
Дефекты производства	25
Старение материалов и другие дефекты	10
<hr/>	
Всего	100

При исследовании электротехнических приборов на надежность [102] установлено распределение дефектов по основным группам деталей и элементов.

Результаты этих исследований с указанием числа случаев отказа различных деталей в процентах таковы:

Сопротивления	43,5
Конденсаторы	18
Трансформаторы	7
Обмотки	4
Выключатели	6
Кристаллы	0,5
Штепсельные разъемы	3
Измерительные приборы	1,5
Электродвигатели	4
Фильтры	1,4
Провода	1
Другие детали и узлы	10,1
Всего	100

При повышении температуры, влажности, при воздействии вибраций и ускорений срок службы деталей снижается. Действие радиоактивного излучения резко уменьшает срок службы полупроводниковых приборов и радиодеталей. Германиевые и кремниевые транзисторы полностью выходят из строя после нейтронного облучения энергией 10^{11} — 10^{12} нейтронов/см², а под влиянием меньшего облучения их срок службы значительно снижается. Также снижается срок службы деталей, имеющих такие изоляционные материалы, как слюда, керамика, полиэтилен, пластмасса, бакелит и др. Причем темп снижения срока службы этих материалов в зависимости от величины радиоактивного излучения близок по величине и линеен в значительных пределах интенсивности облучения.

Под сроком службы деталей обычно понимают число часов работы, на протяжении которого они сохраняют свою первоначальную характеристику в пределах заводских допусков. Неправильное изготовление деталей выявляют в начале их рабочих испытаний, и самое большое число повреждений происходит, как правило, в первые 100 ч их работы.

Обычно экспериментально определяют число деталей в процентах, поврежденных в течение 1000 ч испытаний. Если эту величину обозначить λ_a , а n — число всех деталей в приборе, n_a — число деталей каждого вида, m — ожидаемый срок службы прибора в тысячах часов, λ_k — число приборов в процентах, вышедших из строя за 1000 ч работы, то

$$\lambda_k = \frac{1}{m} \% = \Sigma \lambda_a n_a. \quad (11)$$

Средние значения λ_a для основных устройств и элементов будут:

Гиромоторы	5
Электронные лампы	2,35
Сигнальные устройства	1
Трансформаторы высокого напряжения	0,8
Неподвижные механические детали	0,01—0,1
Подвижные механические детали	0,1—0,5
Потенциометры	0,5
Магнитные усилители	0,5
Реле	0,27—1,5
Выключатели	0,092—0,5
Силовые трансформаторы	0,2
Электродвигатели	0,17
Сигнальные лампочки	0,2
Штепсельные разъемы	0,085
Обмотки	0,057—0,1
Сопротивления	0,02—0,2
Конденсаторы	0,016
Вибраторы	0,1
Печатные схемы	0,1
Транзисторы	0,1
Полупроводниковые диоды	0,1
Полупроводниковые тензорезисторы после наклейки	5—10
Гетероэпитаксиальные тензорезисторы	0,1—2

Эти значения относятся к лабораторным условиям работы деталей. Для устройств, работающих в тяжелых условиях, указанные величины могут возрасти в 10 раз.

Если приборы работают при постоянной температуре и без вибрации, то приведенные величины λ_a могут быть уменьшены в 10 раз.

При миниатюризации датчиков физических величин перед конструктором возникает ряд специфических задач. Эти задачи связаны с использованием достижений микроэлектроники в разработках чувствительных элементов датчиков, основанных на ряде эффектов и явлений, происходящих в твердом теле. Таким комплексным чувствительным (информационным) элементом может быть полупроводниковый блок, в котором преобразование измеряемых параметров в электрический сигнал основано на тензорезисторном эффекте. Твердотельный элемент может содержать в своем объеме или на поверхности специальную интегральную систему, выполняющую роль фильтров, усилителя или согласующего устройства электрических сигналов. Совмещение комплексных упругочувствительных полупроводниковых элементов с интегральными схемами позволяет значительно уменьшить паразитные шумы и открывает новые возможности для телеметрической техники. Внедрение микроэлектроники в разработку датчиков ведет к расширению функциональных возможностей аппаратуры, резкому повышению надежности, уменьшению габаритных размеров, массы, потребляемой мощности и в ряде случаев к снижению стоимости.

Конструктор миниатюрных датчиков должен решать следующие основные задачи.

1. Правильно выбрать тип чувствительного элемента в соответствии с требованиями к характеристикам датчика, обеспечивающим достаточно высокое отношение сигнал—шум.

2. Согласовать чувствительный элемент с упругим элементом с выбором и расчетом оптимальной конструктивной схемы по чувствительности.

3. Умело выбрать материал основных деталей датчика (упругий элемент, рабочая камера, корпус и т. д.) с обеспечением минимального гистерезиса, старения и температурной чувствительности. Всегда желательно, чтобы коэффициенты линейного расширения материалов были малы по величине и близки по значениям.

4. Заложить в конструкцию датчика возможность использования современных методов создания герметичных и вакуумплотных неразъемных соединений между металлическими и неметаллическими деталями (рельефная электросварка, плазменная сварка, применение галлиевых сплавов для пайки, спекание на эмали, вакуумная сварка и т. д.).

5. Стремится конструировать детали, изготавливаемые без снятия стружки.

6. Правильно выбрать защитные покрытия.

7. Правильно выбрать типы электроэлементов и способы электросоединений.

8. Стремится получить в конструкции высокие компоновочные характеристики и обеспечить максимально возможное значение коэффициента заполнения по объему $K_{\text{зап}}^v$.

9. Всегда при конструировании представлять проектируемый датчик в действии, в реальных окружающих условиях.

УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАТЧИКОВ

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В датчиках физических величин в основном применяют элементы двух видов. Это измерительные чувствительные элементы (мембраны, сильфоны, балки, пружины, струны) и кинематические упругие элементы (упругие опоры).

В измерительных упругих элементах происходит преобразование измеряемого датчиком параметра в усилие, которое деформирует упругий элемент и уравнивается возникающими в нем упругими силами.

Кинематические упругие элементы отличаются отсутствием трения и люфтов, что способствует в значительной степени повышению точности измерения датчиком в целом.

Теория и технология изготовления упругих элементов довольно сложны. Этим вопросам посвящен ряд работ [3, 97, 98, 86].

К материалам упругих элементов датчиков предъявляется комплекс многообразных, специфических и противоречивых требований, в связи с этим выбор оптимального материала представляет большие трудности. Во всех случаях он должен обладать высокими упругими свойствами, достаточной прочностью и выносливостью. Механические характеристики материала также должны быть стабильны во времени и в условиях переменной температуры.

Основные требования к материалу упругих элементов датчиков следующие:

1. Малые величины гистерезиса, последействия и релаксация напряжений.
2. Высокая коррозионная стойкость и биологическая пассивность.
3. Незначительная величина температурного коэффициента модуля продольной упругости.
4. Пластичность (для металлических упругих элементов).
5. Малая и определенная величина коэффициента линейного расширения.
6. Высокая электропроводность (для упругих элементов емкостных датчиков).
7. Высокие изоляционные свойства (например, для спекаемых полупроводниковых чувствительных элементов).
8. Немагнитность (для упругих элементов датчиков Холла).
9. Возможность сварки, пайки и применения металлических клеев.
10. Постоянство характеристик во времени.

Основные физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления упругих элементов датчиков, приведены в табл. 2.

Таблица 2
Физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления упругих элементов датчиков

Материал	Марка, ГОСТ, ТУ	Химический состав, %	Модуль упругости, 10^4 Н/мм^2		Температур- ный коэффи- циент моду- ля упруго- сти E $\alpha_{Et}, 1/\text{°C}$	Коэффициент линейного расшире- ния $\alpha_t, 10^{-6}$ $1/\text{°C}$	Термообработка
			E	G			
Сталь хромонике- левая	12Х18Н9Т ГОСТ 5632—72	$C \leq 0,12$ $Mn \leq 2$ $Si \leq 0,8$ $Cr 17-20$ $Ni 8-11$ $Ti 0,8$	19	7	$-5 \cdot 10^{-4}$	16	Закалка 1050—1120° С перед нагартовкой
Сплав 36НХТЮ	ГОСТ 10994—74	$Ni 34,5-36,5$ $Cu 11,5-13,0$ $Ti 2,7-3,2$ $Al 0,9-1,2$ $Mn 0,8-1,3$ Остальное Fe	20	8	$-3 \cdot 10^{-4}$	13	Закалка 920—950° С в воде и дисперси- онное твердение 650—670° С в тече- ние 2—4 ч
Бронза бериллие- вая	Бр. Б2.5 ГОСТ 15834—70	$Ni 0,2-0,5$ $Be 2,3-2,6$ Остальное Cu	13,3	—	$-3,5 \cdot 10^{-4}$	16,6	Закалка 760—780°
Никельтитановая бронза	Бр. БНТ 1,9 ГОСТ 15934—70	$Be 1,85-2,1$ $Ni 0,2-0,4$ $Ti 0,1-0,25$ Остальное Cu	13	—	—	—	Отпуск 320°, 2 ч Закалка 760—780° Отпуск 320°, 2 ч

Продолжение табл. 2

Материал	Марка, ГОСТ, ТУ	Химический состав, %	Модуль упругости, 10^4 Н/мм^2		Температур- ный коэффи- циент моду- ля упруго- сти E $\alpha_{E_t}, 1/^\circ \text{C}$	Коэффициент линейного расшире- ния $\alpha_t, 10^{-6}$ $1/^\circ \text{C}$	Термообработка
			E	G			
Сплав ковар	H29K18 ЧМТУ/ЦИИЧМ 364—60	—	18	—	—	5	Нагартовка
Сплав вольфрамо- вый	ВА-3	—	33	—	$-0,7 \cdot 10^{-4}$	4,5	—
Сплав прецизион- ный	55ВТЮ	Nb 55 Ti 39,5 Al 5,5	11	—	$-0,7 \cdot 10^{-3}$	8	Закалка 725° С в ва- кууме 1 ч. Отпуск 650° С 8 ч
Кремний	—	Si p-типа	1,9	—	—	3,2	—
Германий	—	Ge n-типа	1,3	—	—	3,2	—
Кварц (плавлен- ный)	—	Ge	—	—	—	6,1	—
Сапфир	—	SiO ₂	0,8	—	—	0,4	—
		C	40	—	—	5	—

Наибольший интерес в настоящее время для плоских упругих элементов датчиков физических величин представляет пока малоизвестный дисперсионно-твердеющий прецизионный сплав 55ВТЮ [14], разработанный в ЦНИИчермете. Этот сплав характеризуется высокими упругими свойствами, пластичностью, немагнитностью, коррозионной стойкостью, малым коэффициентом линейного расширения, а также высокой температурной стабильностью модуля продольной упругости.

Конструктивные формы, габаритные размеры и основные расчетные зависимости упругих элементов датчиков физических величин даны в табл. 3.

Упругие элементы определяются упругой характеристикой, чувствительностью, жесткостью, эффективной площадью (для мембран и сильфонов), резонансными частотами и точностью преобразования измеряемого параметра или усиления.

Упругой характеристикой принято называть зависимость между перемещением λ определенной (измерительной) точки¹ упругого элемента и величиной нагрузки P (сила, давление, момент и т. д.). Эта зависимость может быть представлена уравнением, графически и таблично. Конструкция, способ заделки и вид нагружения упругого элемента определяют его характеристику, которая может быть линейной и нелинейной, возрастающей или затухающей.

Отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и перемещением оценивают величиной нелинейности характеристики. Нелинейностью η характеристики называют наибольшее отклонение Δ_{\max} действительной характеристики (полученной экспериментальным путем) от теоретической линейной, отнесенное к наибольшему перемещению измерительной λ_{\max} точки упругого элемента, обычно выражаемое в процентах:

$$\eta = \frac{\Delta_{\max}}{\lambda_{\max}} 100\%. \quad (12)$$

Соответственно для возрастающей характеристики нелинейность положительна, а для затухающей — отрицательна. Однако величина и знак нелинейности не отражает полностью форму и качество характеристики, которые могут быть определены только путем ее построения. Вопрос усложняется наличием у упругих элементов гистерезиса и последействия, величину которых также необходимо учитывать при определении наибольшего отклонения Δ_{\max} путем осреднения нагрузочной и разгрузочной ветвей характеристики.

Чувствительность S упругого элемента является одним из основных его параметров и выражается отношением

$$S = \frac{d\lambda}{dp}. \quad (13)$$

Для упругих элементов с линейной характеристикой

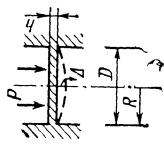
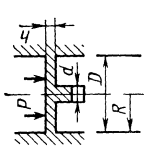
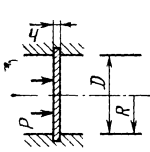
$$S = \frac{\lambda}{p}.$$

В датчиках для измерения давления и параметров вибрации в некоторых случаях применяют несколько упругих элементов, вклю-

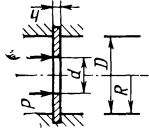
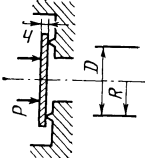
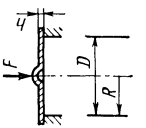
¹ У мембран и сильфонов измерительная точка обычно совпадает с центром масс (см. также работу [27]).

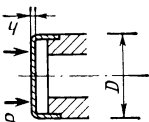
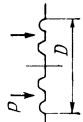
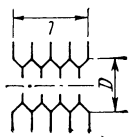
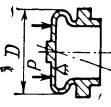
Таблица 3

Конструктивные формы, габаритные размеры и основные расчетные зависимости
упругих элементов датчиков физических величин

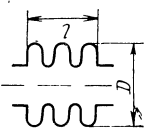
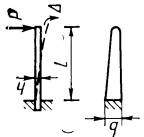
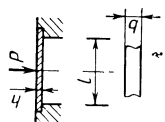
Наименование	Конструктивная схема	Габарит- ные раз- меры, мм	Материал	Тип датчика	Основные расчетные зависимости
Плоская мембранная плита, выполненная за одно целое с кор- пусом датчика		$D=11$ $h=1$	36НХТЮ 55ВТЮ 12Х18Н9Т	Емкостной на высокие давления	$\Delta \approx 0,1 \frac{pR^4}{Et^3}$
Плоская мембранная плита с жестким центром		$D=11$ $d=1 \div 2$ $h=1$	36НХТЮ 55ВТЮ 12Х18Н9Т	Емкостной на высокие давления	$\Delta \approx (0,08-0,1) \frac{pR^4}{Et^3}$
Плоская мембрана, за- щемленная с двух сторон в корпус дат- чика		$D=2,5 \div 10$ $h=0,2 \div 0,5$	Кварц, сапфир	Полупроводниковые датчики давления	$\Delta \approx 0,17 \frac{pR^4}{Et^3}$ $\sigma_{\text{ц}} = +0,49 \frac{pR^2}{h^2}$

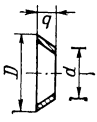
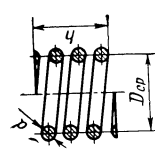
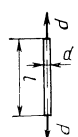
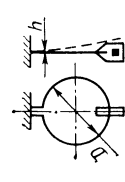
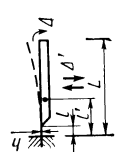
Продолжение табл. 3

Наименование	Конструктивная схема	Габаритные размеры, мм	Материал	Тип датчика	Основные расчетные зависимости
Плоская, зашпеченная по контуру мембрана с 4 центральным отверстием		$D=30 \div 50$ $d=18 \div 30$ $h=0,1 \div 0,15$	36НХТЮ	Тензорезисторный датчик расхода перемного перепада	$\sigma_k = -0,75 \frac{pR^2}{h^3}$ (см. приложение II)
Плоская сварная мембрана		$D=5 \div 20$ $h=0,1 \div 0,4$	36НХТЮ	Тензорезисторные, гальваномагнитные и емкостные датчики давления	$\Delta \approx 0,2 \frac{pR^4}{Eh^3}$ $\varepsilon_{cp} = K' (\varepsilon_{cp})_ж$ (см. приложение I)
Плоская мембрана с выпуклым жестким центром		$D=2,5 \div 4$ $h=0,1 \div 0,2$	36НХТЮ 12Х18Н9Т	Тензорезисторные датчики контактных давлений	(см. [66])

Плоская колпачковая мембрана		$D=3 \div 10$ $h=0,05 \div 0,17$	55ВТЮ	Тензорезисторные датчики давления и скоростного напора	(см. [49])
Гофрированная мембрана с торoidalным краевым гофром и линейной характеристикой		$D=20 \div 35$ $h=0,05 \div 0,1$	Бр. Б2,5 БНГ	Тензорезисторные и гальваномангнитные датчики давления	(см. [3])
Малогабаритный сварной сиффон		$D=3 \div 5$ $l=5 \div 10$	36НХТЮ	Гальваномангнитные датчики давления	(см. [86])
Точечный сиффон с одним гофром, работающий на изгиб		$D=12$ $h=0,2$	Бр. Б2,5	Струнные датчики давления	(см. [69])

Продолжение табл. 3

Наименование	Конструктивная схема	Габарит- ные раз- меры, мм	Материал	Тип датчика	Основные расчетные зависимости
Обычный малогабарит- ный сильфон		$D=10 \div 40$ $h=0,1 \div 0,2$	Томпак, Бр. Б2,5 12Х18Н9Т, Бр. БНТ 1,9	Датчики импульсов давления, гидроста- тические замыкатели и т. д.	(см. [3])
Балка равного сопро- тивления		$h=0,1 \div 0,5$ $l=10 \div 20$	36НХГЮ Бр. Б2,5 55ВГЮ	Тензорезисторные дат- чики давления и рас- хода	$\Delta = \frac{6pl^3}{Eb\delta^3};$ $\sigma = \frac{Eh\Delta}{l^2}$
Балка, заделанная с с двух сторон		$h=0,1 \div 0,3$ $l=2 \div 5$ $b=2 \div 4$	12Х18Н9Т 36НХГЮ	Тензорезисторные дат- чики контактных давлений	$\Delta = \frac{pl^3}{4Eb\delta^3};$ $\sigma = \frac{3pl}{b\delta^2}$

Тарельчатая пружина		$D=10 \div 15$ $d=5 \div 8$ $b=1 \div 1,5$	Бр. Б2,5 36НХТЮ	Пьезодатчики параметров вибраций	См. [62]
Цилиндрическая пружина сжатия		$D_{cp}=2 \div 3$ $d=0,1 \div 0,2$ $h=6 \div 15$	Бр. Б2,5	Гальваномагнитные датчики давления	$C = \frac{10\,000\,d^4}{D_{cp}^3 n}$, где C — жесткость; n — число рабочих витков
Струна		$d=0,05 \div 0,2$ $l=40 \div 100$	Вольфрам	Струнные датчики давления	$\sigma = \frac{p}{S}$; $\varepsilon = \frac{p}{SE}$;
Флястовый упругий элемент		$D=10 \div 20$ $h=0,1 \div 0,2$	36НХТЮ	Гальваномагнитные датчики расхода	$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$
Рычаг с упругим подвесом		$h=0,05 \div 0,1$ $l=1,5 \div 3$ $l'=3 \div 5$ $L=15 \div 25$	36НХТЮ	Гальваномагнитные датчики давления	$\Delta \approx \Delta' \frac{L}{l'}$

ченных параллельно или последовательно (например, в датчиках давления с мембраной и тензометрической балкой). При параллельном включении упругих элементов чувствительность всей системы

$$S = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}}. \quad (14)$$

где S_i — чувствительность i -го упругого элемента.

В случае последовательного включения чувствительность

$$S = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (15)$$

Смешанное (параллельно-последовательное) включение упругих элементов датчиков встречается редко. Для расчета мембран и сильфонов вводят понятие эффективной площади

$$F_{\text{эф}} = \frac{dQ}{dp}, \quad (16)$$

где Q — сила, которую развивает мембрана или сильфон в измерительной точке под воздействием давления p . Эту силу называют тяговым усилием или перестановочной силой.

Для упругих элементов с линейной характеристикой по давлению эффективная площадь практически неизменна на всем участке рабочего хода.

При нелинейной характеристике эффективная площадь изменяется с изменением величины прогиба. В этом случае тяговое усилие определяется уравнением

$$Q = \int_{p_0}^p F_{\text{эф}} dp. \quad (17)$$

Эффективную же площадь определяют по приближенным формулам, выведенным на основе теории [3].

Резонансные частоты колебаний упругих элементов датчиков в значительной степени определяют их динамические характеристики и запаздывание в преобразовании измеряемого параметра. Для датчиков, работающих в жидкостной среде (морская вода, кровь и т. д.), этот вопрос имеет первостепенное значение, в этих случаях учет присоединенных масс необходим. Упругие элементы представляют собой системы с распределенными параметрами, и расчет резонансных частот колебаний их измерительных точек сложен. Этому вопросу посвящено ограниченное число работ, основной из них является [92].

В практике резонансные частоты датчиков определяют в основном экспериментальным путем, например методом переходных характеристик. Для расчета резонансных частот собственных колебаний мембранных датчиков давления необходимо знать величину объема, ометаемого упругой поверхностью мембраны при прогибе.

Этот объем для плоских мембран может быть определен по формуле

$$V = \pi R^2 \omega_0 \frac{z + 1}{2(z + 3)}, \quad (18)$$

где V — ометаемый объем при рабочем давлении; R — радиус мембраны; ω_0 — прогиб центра мембраны; z — параметр, $z = f\left(\frac{h_0}{h}\right)$; h — толщина мембраны.

Значения z даны в работе [3]. Для датчиков давления крови с плоской мембраной можно принять $z=3$. Величину ометаемого объема целесообразно определять экспериментальным путем (этот вопрос рассматривается в приложении I).

Погрешности упругих элементов можно разделить на:

- 1) погрешности, связанные с несовершенством упругих свойств материала;
- 2) температурные, связанные с изменением величины модуля продольной упругости, линейных размеров, а также определяемые наличием градиента температур между измерительной точкой упругого элемента и местом заделки в корпус датчика;
- 3) конструктивные, обусловленные формой упругого элемента и способом заделки в корпус прибора.

В результате пластического течения металлических упругих элементов под нагрузкой во времени возникают погрешности. Для их снижения все металлические упругие элементы должны проходить технологическую операцию стабилизации, при этом погрешность ползучести может быть снижена до 0,05—0,1%.

После того как нагрузка перестала изменяться или уменьшилась до нуля, упругий элемент продолжает деформироваться в течение нескольких часов. Это явление называют упругим последействием. Упругий гистерезис и упругое последействие проявляются одновременно, их величину нельзя снизить стабилизацией.

Упругие элементы из кварца, сапфира и кремния практически не имеют гистерезиса и последействия.

Величины гистерезиса металлических упругих элементов датчиков даны в табл. 4.

Возникновение пластических деформаций при работе упругого элемента недопустимо, в связи с этим величина максимальных напряжений σ_{\max} должна быть меньше предела упругости $\sigma_{\text{уп}}$. Для упругих элементов датчиков физических величин величина коэффициента запаса по пределу упругости $n = \frac{\sigma_{\text{уп}}}{\sigma_{\max}}$ колеблется в пределах 1,5—3.

Изменение температуры окружающей упругий элемент среды вызывает изменение модуля продольной упругости материала. При перепадах температуры до 50°C величину модуля упругости с достаточной точностью можно определить по известной зависимости

$$E_t = E_0 (1 + \alpha_E \Delta t). \quad (19)$$

Для большинства материалов величина α_E (температурный коэффициент модуля упругости E) отрицательна и модуль упругости с возрастанием температуры падает, что влечет за собой повышение чувствительности упругого элемента и смещение нуля отсче-

Таблица 4

**Величины гистерезиса металлических упругих
элементов датчиков**

Материал упругого элемента	Величина гистерезиса, %	Способ заделки упругого элемента в корпус датчика
Сталь 12Х18Н9Т	0,8—1,5 1—2,5	Конденсаторная рельефная сварка Пайка припоем 3% Ag, 97% Sn
Сплав 36НХТЮ	0,1—0,7 1—1,5	Конденсаторная рельефная сварка Пайка припоем 3% Ag, 97% Sn
Бронза бериллиевая Бр. Б2,5	0,2—0,8	Заделка при помощи резьбового кольца
Сплав 55ВТЮ	0,1—0,6 0,2—0,8	Мембрана изготовлена за одно целое с корпусом датчика Шовная импульсная сварка

та измеряемого параметра. Известен ряд способов компенсации этой погрешности [22], которые, как правило, усложняют конструкцию датчика и ухудшают его динамические характеристики. В некоторых типах датчиков эти способы компенсации не применяются (например, в биомедицинских датчиках).

В общем случае погрешность

$$\eta_t^E = \frac{\Delta\lambda_t}{\lambda}, \quad (20)$$

где $\Delta\lambda_t$ — температурное изменение перемещения упругого элемента.

Для упругих элементов постоянной жесткости относительная приведенная температурная погрешность

$$\eta_t^E = \alpha_E \Delta t \cdot 100\%. \quad (21)$$

В случае ограниченного интервала рабочих температур датчиков (например, $\Delta t = 15 \div 30^\circ\text{C}$) величина η_t^E невелика и не превышает 0,3—1%.

Суммарная температурная погрешность упругих элементов датчиков

$$\eta_t = \eta_t^E + \eta_t^{\Delta\alpha_t} + \eta_t^{\text{Grad } t}, \quad (22)$$

где η_t^E — температурная погрешность за счет изменения величины модуля продольной упругости E материала с температурой; $\eta_t^{\Delta\alpha_t}$ — температурная погрешность за счет разности коэффициентов линейного расширения деталей заделки упругого элемента; $\eta_t^{\text{Grad } t}$ —

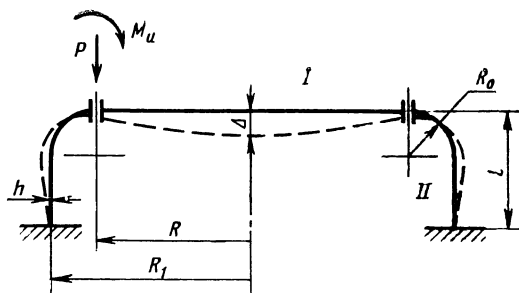


Рис. 1. Схема колпачковой мембраны:

I — плоская центральная часть мембраны; *II* — цилиндрический буртик с тороидальным гофром

температурная погрешность, определяемая наличием градиента температуры между измерительной точкой упругого элемента и корпусом датчика.

Погрешности $\eta_t^{\Delta \alpha_t}$ и $\eta_t^{\text{Grad } t}$ значительны, они в основном и определяют величину η_t , снижать их затруднительно. Эти погрешности рассмотрены ниже.

2. РАСЧЕТ ПЛОСКИХ КОЛПАЧКОВЫХ МЕМБРАН С КРАЕВЫМ ГОФРОМ

Колпачковые плоские мембраны с цилиндрическим буртиком и тороидальным краевым гофром являются новыми упругими элементами датчиков давления [48]. Эти мембраны характеризуются повышенной чувствительностью, технологичностью изготовления и перспективны при разработках малогабаритных и миниатюрных тензометрических, гальваномagnetных, емкостных, индуктивных и струнных датчиков давления.

Колпачковая мембрана (рис. 1) состоит из плоской центральной части радиуса R и цилиндрического буртика, сопряженных с краевым гофром радиусом R_0 .

Имеются следующие основные расчетные зависимости:

1. Прогиб w_0 центра мембраны при малых перемещениях и при $R_0 \leq l$

$$w_0 = \frac{pR^4}{64D} \left[1 + \frac{4}{\frac{R}{KD} + (\mu + 1)} \right] = \frac{pR^4}{64D} m, \quad (23)$$

где p — давление; D — цилиндрическая жесткость;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)},$$

μ — коэффициент Пуассона;

$$K = \frac{4\beta^3 R^2}{Eh_{\text{ц}}} \chi;$$

здесь $h_{\text{ц}}$ — толщина цилиндрического буртика;

$$\beta = \frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{Rh_{\text{ц}}}}, \quad \chi = \frac{\text{ch } \beta l - \cos \beta l}{\text{sh } \beta l + \sin \beta l},$$

для $\mu=0,3$ имеем $\beta \approx \frac{1,27}{\sqrt{Rh_{\text{ц}}}}$.

Второе слагаемое в скобках в формуле (23) учитывает влияние цилиндрического краевого гофра на прогиб центра плоской мембраны.

Можно записать

$$\frac{R}{KD} = \frac{1,27 h_{\text{ц}} \sqrt{Rh_{\text{ц}}}}{\chi h^3}.$$

При $h_{\text{ц}}=h$

$$\frac{R}{KD} = 1,27 \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{R}{h}}.$$

При $l \rightarrow 0$ $\chi \rightarrow 0$ и величина второго слагаемого в скобках формулы для w_0 стремится к нулю. При $l \geq 0,7 \sqrt{Rh}$ цилиндрический гофр будет оказывать уже заметное влияние (около 10%) на характеристику преобразователя в области малых перемещений. С ростом $\frac{l}{\sqrt{Rh}}$ влияние краевого гофра еще более усиливается.

2. Радиальные σ_r и касательные σ_t напряжения в плоской части мембраны

$$\sigma_r \Big|_{z=\frac{h}{2}} = \pm \frac{3}{8} \frac{pR^2}{h^2} \left[\frac{r^2}{R^2} (\mu + 3) - \right. \\ \left. - (\mu + 1) \frac{1 + K(\mu + 3) \frac{D}{R}}{K(\mu + 1) \frac{D}{R} + 1} \right]; \quad (24)$$

$$\sigma_t \Big|_{z=\frac{h}{2}} = \pm \frac{3}{8} \frac{pR^2}{h^2} \left[\frac{r^2}{R^2} (3\mu + 1) - (\mu + 1) \frac{1 + K(\mu + 3) \frac{D}{R}}{K(\mu + 1) \frac{D}{R} + 1} \right]. \quad (25)$$

$$\text{Сомножитель } \frac{1 + K(\mu + 3) \frac{D}{R}}{K(\mu + 1) \frac{D}{R} + 1} = n$$

учитывает влияние цилиндрического краевого гофра. При $n=1$ (т. е. $l=0$) выражения для σ_r и σ_t принимают вид аналогичных известных формул для мембран с жесткой заделкой по контуру. Для относительной толщины $\frac{h}{R}$, максимальной в практических условиях $\frac{h}{R} = \frac{1}{5}$, величина n составляет 1,56. Это значит, что при замене мембраны с жесткой заделкой на мембрану с цилиндрическим гофром в центре мембраны σ_r увеличится на 56%, а на краю ($r=R$) уменьшится на 35%. При меньших значениях $\frac{h}{R}$ указанный эффект будет меньше.

3. При соизмеримости размеров l и R_0 пренебрегать податливостью участка закругления по радиусу R_0 нельзя. В этих случаях для колпачковых мембран имеются следующие основные приближенные расчетные зависимости:

$$\sigma_r \Big|_{z=\frac{h}{2}} \approx \mp \left[\frac{Eh(1+\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{3}{4} \frac{pR^2}{Eh^2} \times \right. \\ \times \frac{\frac{R}{h}(1-\mu^2) + \frac{1}{3}\beta^3 R^2 h(3+\mu) + 8\frac{R_0^2}{Rh}}{R - \frac{1}{3}\frac{\beta^3 R^2 h^2}{1-\mu}} - \\ \left. - \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{pr^2}{16D}(3+\mu) \right], \quad (26)$$

в центре мембраны при $r=0$ имеем

$$\sigma_{r=0} \Big|_{z=\frac{h}{2}} \approx \mp \frac{3}{8} \frac{pR^2}{h^2} \times \\ \times \frac{R(1+\mu) + \frac{1}{3}\beta^3 R^2 h \frac{(3+\mu)}{(1-\mu)} + 8\frac{R_0^2}{R(1-\mu)}}{R - \frac{1}{3}\frac{\beta^3 R^2 h^2}{1-\mu}}. \quad (27)$$

3. СОЕДИНЕНИЕ КОНЦОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ БАЛОК С ЦЕНТРОМ МЕМБРАН

В датчиках для измерения давления с гофрированными мембранами используют тензометрическую балку с полупроводниковыми тензорезисторами, свободный конец которой связан с центром мембраны [50, 51]. Здесь возможны две конструктивные схемы связи (рис. 2).

В схеме, приведенной на рис. 2,а, тензометрическая балка защемлена и нагружена сосредоточенной силой на свободном конце, в то время как в схеме, приведенной на рис. 2,б, балка зашлемлена

и нагружена моментом и силой на подвижном зажатом конце. В первой схеме отсутствует неподвижная связь между жестким центром мембраны и свободным концом балки, что обуславливает дополнительные погрешности датчика, связанные со скольжением жесткого центра по свободному концу балки. Вторая схема

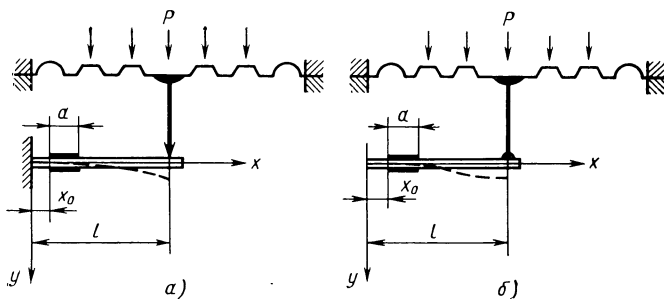


Рис. 2. Конструктивные схемы связи концов тензометрических балок с центром мембраны:

a — схема с подвижной связью; *б* — схема с жесткой связью

(рис. 2,б) не имеет этого недостатка. Рассмотрим эти две конструктивные схемы датчиков с точки зрения их чувствительности.

Ясно, что форма изгиба балок будет различна. Введем обозначения, присвоив величинам схем, показанных на рис. 2, *a* и *б* индексы 1 и 2 соответственно:

l — длина тензометрической балки; *b* — ее ширина; *h* — толщина; *ρ* — плотность; *EI* — жесткость на изгиб; *m* — масса.

Относительная линейная деформация тензоэлементов с базой, жестко связанных с балкой, определяется по зависимости [91]

$$\varepsilon = \frac{h}{2a} \int_{x_0}^{x_0+a} y''(x) dx. \quad (28)$$

Вычисления дают:

$$\varepsilon_1 = \frac{3h}{2l^3} \left(l - x_0 - \frac{a}{2} \right) y_1(l); \quad \varepsilon_2 = \frac{3h}{l^3} (l - 2x_0 - a) y_2(l). \quad (29)$$

Очевидно, что для схемы (см. рис. 2,а) величина ε не может обратиться в нуль, в то время как для второй схемы (см. рис. 2,б). ε равно нулю, если тензоэлементы расположены посередине балки. Также видно, что с уменьшением величин *a* и *x*₀ относительная деформация тензоэлементов и чувствительность датчика возрастают. Если в элементе связи (штифте) между мембраной и балкой действует статическая сила *P*₀, то прогибы конца балки определяются известными зависимостями

$$y_1(l) = \frac{P_0 l^3}{3EI}; \quad y_2(l) = \frac{P_0 l^3}{12EI} \quad (30)$$

и линейные относительные деформации тензоэлементов

$$\varepsilon_1 = \frac{3h}{2l^3} \left(l - x_0 - \frac{a}{2} \right) \frac{P_0 l^3}{3EI}; \quad \varepsilon_2 = \frac{3h}{l^3} (l - 2x_0 - a) \frac{P_0 l^3}{12EI}. \quad (31)$$

В реальных конструкциях стремятся величину x_0 сделать минимальной (доли миллиметра). База тензоэлемента (величина a) в современных конструкциях принята равной 2 мм (например, тензорезисторы гантельного типа Ю-8 имеют базу 2 мм), в то время как величина l (длина тензометрической балки) составляет не менее 10—12 мм. Таким образом, приближенно чувствительность тензометрической балки первой схемы к силе P_0 при прочих равных условиях в 2 раза выше, чем чувствительность тензометрической балки, выполненной по второй схеме. Учитывая далее, что жесткости балки и мембраны в рассматриваемых схемах включены параллельно, а величина жесткости мембраны выбирается на порядок выше, чем жесткость балки, в конечном счете обе схемы по чувствительности становятся равноценными.

Исследования частотных свойств рассматриваемых схем датчиков дают следующие зависимости для динамических прогибов при действии на жесткий центр мембраны и штифт массы M гармонической силы $P = P_0 \sin \omega t$ и значительных частотах ω :

$$y_1(l) \approx y_2(l) \approx \frac{P_0 l^3}{EI \gamma^4} = \frac{P_0}{M \omega^2}, \quad (32)$$

$$\text{где } n = \frac{M}{m}; \quad \gamma^2 = \omega^2 \sqrt{\frac{\rho b h}{EI}}.$$

Таким образом, обе схемы по частотным свойствам также близки друг другу.

С целью возможности измерения давления жидкости (например, крови) с частотами 50—60 Гц, собственные частоты колебаний упругой чувствительной системы датчиков в жидкости должны быть не менее 100—150 Гц. Эти высокие требования могут быть выполнены только при наличии мембраны с большой жесткостью (прогиб центра мембраны при максимальном рабочем давлении не должен превышать 5—20 мкм). Частотные свойства датчика в основном определяются характеристиками мембраны, так как при этом жесткость тензометрических балок устанавливается на порядок ниже жесткости мембраны.

Схема, показанная на рис. 2,а, не позволяет производить измерения отрицательных давлений, что также является ее недостатком. В целом схема, приведенная на рис. 2,б, предпочтительнее схемы на рис. 2,а. В настоящее время большинство тензометрических датчиков давления выполнены по схеме, показанной на рис. 2,б. Ю. Ф. Кабатов и Л. Г. Гришин в работе «Вопросы проектирования мембранных датчиков с консольным тензопреобразователем» [30] дают расчетный и графический материал для определения номинальных значений конструктивных параметров датчиков давления, выполненных по схеме, приведенной на рис. 2,б, с использованием тензорезисторов с базой 3 мм и балкой с концентратором напряжений.

4. ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР МЕЖДУ МЕМБРАНОЙ И КОРПУСОМ ДАТЧИКА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

В ряде датчиков (например, в авиационных, медицинских датчиках давления и т. д.) по условиям эксплуатации возможна разность температур между центром мембраны и корпусом. При этом возникают температурные напряжения в мембране и ее чувствительность изменяется. Если разность температур между центром мембраны и корпусом положительна, то чувствительность мембраны увеличивается; при отрицательной разности чувствительность уменьшается.

При оценке влияния разности температур на чувствительность мембраны будем считать, что распределение температуры по радиусу мембраны постоянно.

Колпачковая мембрана. Температурная деформация мембраны вызывает изгиб срединной поверхности. Угол поворота нормали к срединной поверхности

$$\vartheta_t = C\rho, \quad (33)$$

где ρ — относительный радиус мембраны, $\rho = \frac{r}{R}$; C — коэффициент, определяемый удлинением срединной поверхности мембраны от температуры.

Изгиб срединной поверхности мембраны обусловливается удлинением как плоской части мембраны, так и краевого гофра. Удлинение

$$\delta r = (2R + \pi R_0) \alpha_t \Delta t, \quad (34)$$

где Δt — перепад температуры; α_t — температурный коэффициент линейного расширения материала мембраны; R — радиус плоской части мембраны; R_0 — радиус краевого гофра.

Угол поворота нормали к срединной поверхности в точке соприкосновения плоской части мембраны с краевым гофром определяется выражением

$$\vartheta_t = 2 \sqrt{1 + \frac{\pi R_0}{2R}} \alpha_t \Delta t \frac{r}{R}. \quad (35)$$

Изгибные напряжения

$$\sigma_t = \frac{E t h}{2(1 - \mu^2)} \left(\vartheta'_t - \mu \frac{\vartheta_t}{r} \right). \quad (36)$$

Если теперь под Δt понимать некоторую эквивалентную температуру, действующую на мембрану, то достаточно в выражение (36) подставить значение (35), чтобы получить изгибные напряжения σ_t , возникающие только в результате температурных воздействий:

$$\sigma_{t \text{ экв}} = \frac{E h}{R(1 + \mu)} \sqrt{6 \alpha_t \Delta t_{\text{экв}} \left(1 + \frac{\pi R_0}{2R} \right)}. \quad (37)$$

Представим, что на мембрану действует тепловой поток с постоянной интенсивностью q_0 . Тогда при учете отвода теплового

потока через элементы крепления мембранного преобразователя получим следующую зависимость изменения температуры в радиальном направлении:

$$\Delta t = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \frac{q_0 (R + R_0)^2}{\lambda h}, \quad (38)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала мембраны.

Средняя величина приращения температуры для мембраны может быть принята равной

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{q_0 (R + R_0)^2}{8\lambda h}. \quad (39)$$

Если подставить значение Δt из формулы (38) в выражение (37), то можно определить значения добавочных изгибных напряжений, вызванных температурным воздействием. Указанные добавочные напряжения приведут к изменению чувствительности мембраны по напряжению. Появится дополнительная погрешность за счет градиента температур, определяемая формулой

$$\eta_{\text{Grad}} \Big|_{\Delta t} = \frac{\sigma_{t \text{ экв}}}{\sigma} 100\% = \frac{\frac{E_i h}{R(1+\mu)} \sqrt{\frac{6\alpha_i \Delta t_{\text{экв}} \left(1 + \frac{\pi R_0}{2R}\right)}{\sigma}}}{\sigma} 100\%, \quad (40)$$

где σ — изгибные напряжения, вызванные рабочим давлением, действующим на мембрану.

Плоская мембрана, жестко заделанная по контуру (по данным В. В. Богданова и С. М. Похвалинского). Прогиб центра мембраны

$$\lambda_0 = \frac{pR^4}{\frac{16}{3} R^2 T_r + 64D}, \quad (41)$$

где p — распределенное давление, действующее на мембрану; R — радиус заделки мембраны; T_r — растягивающая сила на единицу периметра; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)^2}$ — цилиндрическая жесткость.

Относительное удлинение мембраны

$$\varepsilon = \frac{T_r (1-\mu)}{hE};$$

тогда

$$\frac{\lambda_0}{h} = \frac{1}{E} \frac{a^4 p}{6 \left(1 + \frac{4}{6} \frac{\varepsilon a^2}{(1-\mu)} \right)}, \quad (42)$$

где $a = \frac{R}{h}$ — конструктивный параметр.

При отсутствии натяжения $\varepsilon = 0$ и

$$\frac{\lambda_0}{h} = \frac{a^4 p}{6E_{\perp}}.$$

Если натяжение мембраны вызвано только коэффициентом линейного расширения α_t , то $\varepsilon = \varepsilon_t = \pm \alpha_t \Delta t$ и относительное изменение чувствительности мембраны

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 \pm \frac{4}{6} \frac{1}{1-\mu} \alpha_t \Delta t a^2}. \quad (43)$$

При нагревании мембраны чувствительность возрастает и в знаменателе имеет знак «—». Для малых величин перегрева ($\Delta t \approx 10-20^\circ\text{C}$) относительное изменение чувствительности на 1°C в процентах

$$\eta_t^{\text{Grad } t} \Big|_{\Delta t=1} = \frac{\Delta S}{S_0} 100\% = \frac{4}{6} \frac{a^2}{1-\mu} \alpha_t \cdot 100\%. \quad (44)$$

На рис. 3 дана зависимость $\eta_t^{\text{Grad } t}$ для плоских тонких мембран для различных значений α_t материала мембраны и конструктивного параметра $a = \frac{R}{h}$. При заделке мембраны в корпус с предварительным натяжением (например, при рельефной сварке [52]) относительное удлинение мембраны при нагреве

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t,$$

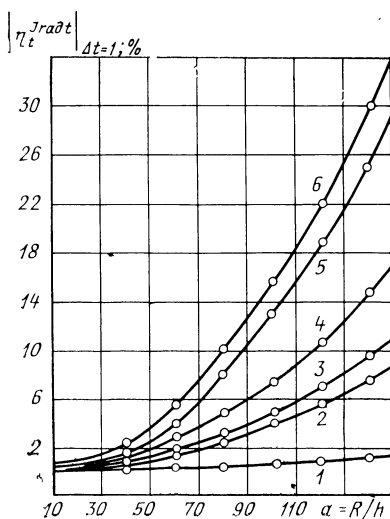


Рис. 3. График зависимости относительного изменения чувствительности на 1°C плоских мембран без натяга для различных значений α_t материала мембраны и конструктивного параметра

$$a = \frac{R}{h} :$$

1— $\alpha_t = 0,4 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 2— $\alpha_t = 4 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 3— $\alpha_t = 5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 4— $\alpha_t = 8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 5— $\alpha_t = 13,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 6— $\alpha_t = 16 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$

где ε_0 — относительное удлинение мембраны, вызванное предварительным натяжением.

В этом случае можно записать

$$\frac{\lambda_0}{h} = \frac{1}{E} \frac{1}{6 \left(1 + \frac{4a^2}{6(1-\mu)} \varepsilon_0 - \frac{4}{6} \frac{a^2}{(1-\mu)} \alpha_t \Delta t \right)}. \quad (45)$$

Если σ_{or} — напряжение в мембране после ее заделки, то

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_{or}(1-\mu)}{E}$$

и

$$\eta_t^{\text{Grad } t} \Big|_{\Delta t=t} = \frac{\Delta S'}{S_0} 100\% = \frac{1}{1 + \frac{4}{6} \frac{\sigma_{or}}{E} a^2} \frac{4a^2 \alpha_t}{6(1-\mu)} 100\%. \quad (46)$$

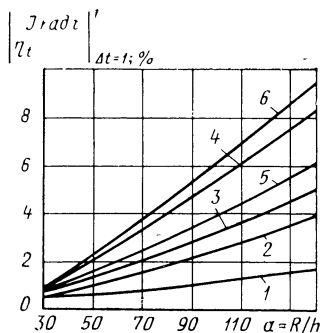
Величина $1 + \frac{4}{6} \frac{\sigma_{or}}{E} a^2$ определяет снижение температурной чувствительности плоской мембраны за счет предварительного натяжения. Например, при $\sigma_{or}=60$ Н/мм², $E=100\,000$ Н/мм² и $a=50$ имеем

$$1 + \frac{4}{6} \frac{60}{100\,000} 50^2 = 2.$$

Рис. 4. График зависимости относительного изменения чувствительности на 1°C плоских мембран с натягом для различных сплавов от конструктивного параметра

$$a = \frac{R}{h} :$$

1 — сплав 55ВТЮ; $\sigma_{or}=60$ МПа; 2 — сплав 55ВТЮ; $\sigma_{or}=30$ МПа; 3 — Бронза Бр.Б2,5; $\sigma_{or}=60$ МПа; 4 — Бронза Бр.Б2,5 $\sigma_{or}=30$ МПа; 5 — сплав 36НХТЮ; $\sigma_{or}=60$ МПа; 6 — сплав 36НХТЮ; $\sigma_{or}=30$ МПа



Таким образом, предварительный натяг существенно снижает температурную чувствительность. На рис. 4 дан график зависимости относительного изменения чувствительности на 1°C плоских мембран с натягом для различных сплавов от конструктивного параметра

$$a = \frac{R}{h}.$$

5. ЗАПАЗДЫВАНИЕ В ПЕРЕДАЧЕ ДАВЛЕНИЙ МЕМБРАННЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

При измерениях давления среды показания приборов являются функциями времени. Системы, измеряющие давление, имеют опреде-

ленную инерционность и запаздывают в показаниях, что вызывает-ся в основном наличием трактов передачи давлений среды от объекта до мембранного упругого элемента датчика. Наличие объемов в трактах передачи и прогиб мембран усугубляют запаздывания. Величина запаздывания характеризуется постоянной времени. Часто инерционность датчика характеризуют первой собственной частотой затухающих колебаний датчика, измеренной методом переходных характеристик при эксплуатации датчика. Собственные частоты колебаний датчика в жидкостной среде в десятки раз ниже, чем в воздушной. Разработка высокочастотных датчиков давления (с $f_{\text{соб}} > 100$ Гц) для жидкостных сред является сложной задачей, так как здесь допустимые прогибы центра мембран не должны превышать единиц микрон. Вопросы запаздывания в датчиках давления исследовало ограниченное число авторов. Например, Г. О. Фридлиндер получил выражение постоянной времени при выводе дифференциального уравнения авиационного вариометра [103].

Для вывода формулы запаздывания показаний датчика (вывод формулы сделан С. Ф. Романовым) рассмотрим приемную мембранную камеру объемом v , соединенную с объектом измерений трубкой длиной l и диаметром $d_{\text{тр}}$ (рис. 5).

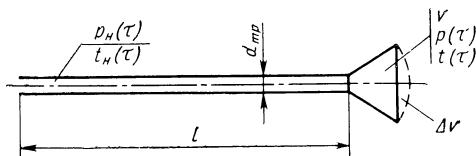


Рис. 5. Схема к расчету запаздывания в передаче давлений в мембранных камерах с трубопроводом

Состояние среды, передающей давление до приемной трубки и в мембранной камере, характеризуется соответственно значениями давления и температуры во времени $p_n(\tau)$; $t_n(\tau)$ и $p(\tau)$; $t(\tau)$. За время $d\tau$ в мембранную камеру поступит объем среды весом

$$dG = \gamma \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} v d\tau, \quad (47)$$

где γ — плотность среды, кг/м³; $d_{\text{тр}}$ — диаметр трубки, м; v — скорость среды в конце трубки, м/с; G — вес среды, Н; τ — время, с.

Из условия неразрывности можно написать второе выражение для dG в виде

$$dG = d(V\gamma) = V_0 d\gamma + \gamma_0 dV, \quad (48)$$

где V_0 и γ_0 — первоначальный объем мембранной камеры и плотность среды в ней.

После приравнивания правых частей выражений для dG получим

$$\frac{\pi d_{\text{тр}}}{4} v d\tau = V_0 \frac{d\gamma}{\gamma_0} + dV.$$

Скорость v может быть определена по известной формуле Пуазеля

$$v = \frac{d_{\text{тр}}^2}{32\mu_l l} (p_n - p), \quad (49)$$

где μ_l — коэффициент динамической вязкости, Па·с, l — длина трубки, м

Если среда — воздух, то изменение объема воздуха в мембранной камере происходит при постоянной температуре по закону Бойля—Мариотта:

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{dp}{\gamma} = \text{const.}$$

Для мембранных камер имеем зависимость

$$\frac{dV}{dp} \approx k \approx \text{const.},$$

где k — крутизна зависимости объема воздуха в камере от давления в ней, $\frac{\text{м}^3}{\text{Н/м}^2}$.

Учитывая эти три зависимости, получим уравнение

$$\frac{128l}{\pi d_{\text{тр}}^4} \mu_l \left(\frac{V_0}{p_n} + k \right) \frac{dp}{d\tau} + p = p_n(\tau).$$

Обозначая переменный коэффициент $\left[\frac{128l}{\pi d_{\text{тр}}^4} \mu_l \left(\frac{V_0}{p_n} + k \right) \right]$, имеющий размерность времени и носящий название постоянной времени, через h' , окончательно получим

$$h' \frac{dp}{d\tau} + p = p_n. \quad (50)$$

Расчет частотных характеристик датчиков давления приведен в приложении I.

6. ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ НОВЫХ ТИПОВ

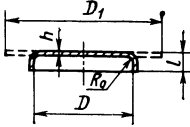
Технология изготовления колпачковых мембран и их характеристики. Колпачковые мембраны, отличающиеся высокой чувствительностью, отсутствием коробления, конструктивностью формы, возможностью миниатюризации и технологичностью соединения шовной импульсной электросваркой с корпусом датчика, находят все более широкое применение в датчиках для измерения давления в различных условиях (внутриполостные и выносные датчики дав-

ления крови, датчики давления морской воды и скоростного напора в пограничном слое, датчики давления грунта и т. д.).

Основные характеристики мембраны приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные характеристики мембраны

Общий вид колпачковой мембраны	Размеры, мм	Рабочий диапа- зон измеряе- мых дав- лений, мм рт. ст.	Тип и назначение датчика
	$D=3,6$ $h=0,06$ $l=0,7$ $R_0=0,3$	От -20 до +1000	Тензометрические внутриполостные для измерения арте- риального и веноз- ного давления, а также скоростного напора и др.
	$D=6$ $h=0,1$ $l=1,2$ $R_0=0,6$	От -20 до +1000	Тензометрические вживляемые для из- мерения давления морской воды при движении животных
	$D=12$ $h=0,1$ $l=1,5$ $R_0=1,2$	От -20 до +300	Тензометрические вы- носные для измере- ния артериального и венозного давле- ния
	$D=25 \div 40$ $h=0,3 \div 0,8$ $l=4 \div 6$ $R_0=2,5 \div 4$	От 1000 до 4000	Тензометрические для измерения давления грунта и др.

Колпачковые мембраны из сплава 55ВТЮ изготавливают холодной вытяжкой в штампах. Для определения диаметра заготовки следует пользоваться формулой.

$$D_1 = KD, \quad (51)$$

где D_1 — диаметр заготовки, мм; K — коэффициент вытяжки; D — наружный диаметр мембраны, мм.

Коэффициент вытяжки K определяют по формуле

$$K = \sqrt{1 + 4 \frac{l}{D}}.$$

Для повышения чувствительности мембраны величину радиуса выбирают равной $K=0,1D$; эту величину определяет радиус закругления пуансона.

Мембраны после вытяжки подрезают на токарном станке в размер с использованием оправок и вращающегося центра. С целью получения высоких упругих свойств, а также обеспечения плоскости рабочей части (мембраны после вытяжки имеют некоторую выпуклость) производят термообработку мембран с заневоливанием в стальных стружниках между стальными вкладышами с плоскими торцами и шероховатостью поверхности не ниже $\nabla 7$.

При изготовлении мембран из сплава 55ВТЮ рекомендуется следующий режим термообработки: нагрев в вакууме при 650°C в течение 8 ч и охлаждение совместно с печью.

Типовая статическая экспериментальная характеристика колпачковой мембраны диаметром 3,6 мм из сплава 55ВТЮ показана на рис. 6 (характеристику снимали бесконтактно-оптическим методом).

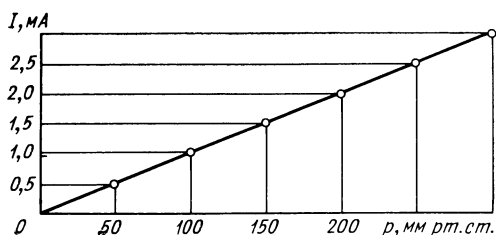


Рис. 6. Статическая характеристика прогиба центра колпачковой мембраны диаметром 3,6 мм

Технология сварки плоских мембран с корпусом датчика и их характеристики. Плоские тонкие мембраны нашли широкое применение в разработанных датчиках для измерения давления.

Такие мембраны имеют существенно затухающую характеристику в области больших прогибов. В прецизионных датчиках с целью повышения частотных свойств и линейности характеристики используют лишь небольшую часть возможного хода тонкой мембраны, не превышающую, как правило, $1/10$ ее толщины. При этом нелинейность характеристики мембраны составляет $0,3\text{--}1\%$. Способ заделки плоской мембраны в корпус датчика в значительной степени определяет ее качество. До настоящего времени плоские тонкие мембраны обычно заделывали с натяжением в корпус прибора при помощи гаек с ножевидными торцами [3], однако при этом затруднительно установить заданную величину натяжения мембраны с сохранением характеристик во времени. Этот способ заделки также связан с возрастанием габаритных размеров конструкции и образованием узких полостей в местах заделки, что в ряде случаев недопустимо (например, для биологических датчиков).

Заделка тонких плоских мембран посредством пайки и склеивания также имеет ряд недостатков, главные из которых — малая надежность и необеспечение высоких упругих свойств. В ОКБ БИМК

ЛЭТИ автором разработан более современный способ заделки тонких (0,04—0,3 мм) плоских мембран — рельефная конденсаторная сварка [52]. При использовании этого метода посадочное место под сварку в корпусе датчика выполняют в виде ножа (рис. 7) с торцевой ленточкой шириной 0,15—0,3 мм. Мембраны сваривают на точечной конденсаторной машин МГК-5-3, предназначенной для сварки полупроводниковых приборов, работающей в комплекте со станцией питания и управления СПУ-02 (разработка ВНИИЭСО, Ленинград). Для качественной сварки должна обеспечиваться вы-

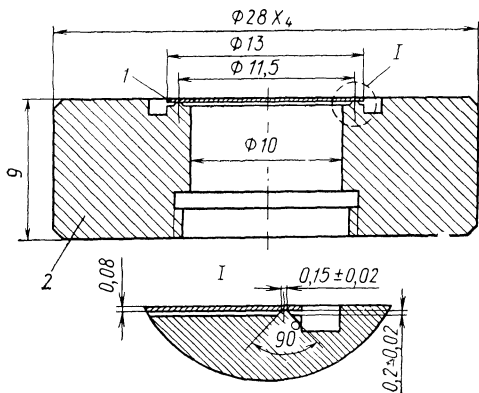


Рис. 7. Корпус датчика давления:
1 — мембрана; 2 — основание

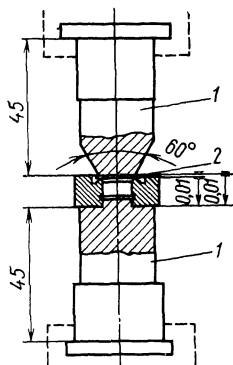


Рис. 8. Расположение электродов в процессе сварки:
1 — электроды; 2 — мембрана

сокая плоскостность (не хуже 0,01—0,02 мм) мест контакта — электроды, корпус, мембрана (рис. 8); материал корпуса и мембраны должен быть одинаков (например, сплавы 12Х18Н9Т, 36НХТЮ, 55ВТЮ) и тщательно обезжирен. Оптимальный режим сварки устанавливают экспериментальным путем с осциллографированием величины тока сварки (обычно режим устанавливают при сварке 30—50 образцов).

Для получения механически прочного, вакуумплотного соединения мембрана — корпус имеется несколько оптимальных режимов сварки, обеспечивающих различную величину натяжения мембраны после сварки. Величина натяжения (обычно $\sigma_{\text{ср}} = 30 \div 100$ Н/мм²) определяется значением градиента температур между мембраной и корпусом в процессе сварки.

Таким образом, рельефная емкостная сварка обеспечивает не только прочность и строгую фиксацию шва, но и определяет величину натяжения мембраны, которую можно изменять, меняя режим сварки. При постоянстве режима величина натяжения мембраны остается неизменной на образцах одной партии деталей.

Испытания показали, что рассматриваемый способ соединения мембраны с корпусом не может считаться «жесткой заделкой мембраны по контуру» в обычном понимании этого термина. Для

радиальных и тангенциальных напряжений в точках, отстоящих от центра на величину r мембраны, жестко заделанной по контуру, известны зависимости [17]

$$\sigma_r = \frac{3p}{8h^2} [R^2 (1 + \mu) - r^2 (3 + \mu)];$$

$$\sigma_t = \frac{3p}{8h^2} [R^2 (1 + \mu) - r^2 (1 + 3\mu)], \quad (52)$$

где σ_r , σ_t — напряжения в радиальном и тангенциальном сечениях; p — распределенное давление на мембрану; μ — коэффициент Пуассона материала мембраны; R — радиус мембраны в заделке; r — текущее значение радиуса.

Установлено, что расчетные значения напряжений в области центра мембраны по величине близки к полученным экспериментально. Однако эксперимент не дал ожидаемого изменения знака напряжений в сечениях, где $r^2(3+\mu) \geq R(1+\mu)$. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в предлагаемом способе заделки, очевидно, имеет место некоторый поворот сечений по периметру при прогибе мембраны. Это необходимо учитывать при конструировании датчиков с плоскими мембранами, сваренными с корпусом по предлагаемому способу (например, при выборе схемы расположения тензорезисторов на мембране и т. д.). Рабочая характеристика одного из тензорезистивных датчиков давления крови с рассмотренным мембранным упругим элементом показана на рис. 9.

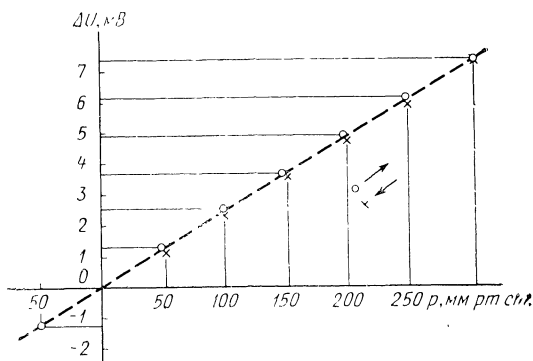


Рис. 9. Рабочая характеристика тензорезисторного датчика давления с мембраной, приваренной рельефной конденсаторной сваркой

Технология изготовления миниатюрных сварных сильфонов и их характеристики. Сварные сильфоны по сравнению с сильфонами, изготовленными гидравлическим или механогидравлическим [53, 86] методом, имеют лучшие характеристики. Использование сварных сильфонов обусловлено повышенными требованиями к постоянству их эффективной площади, малой длиной и большим

отношением их прогиба к длине в свободном состоянии, малой нелинейностью характеристики, необходимостью обеспечивать повышенную надежность и жесткий доступ на свободную длину. К недостаткам сварных сильфонов следует отнести возможное снижение их коррозионной стойкости из-за наличия большого числа сварных швов, а также высокую себестоимость по сравнению с обычными сильфонами. Применение сварных сильфонов целесообразно при разработках миниатюрных датчиков давления, перемещения и т. д. Представляется возможным изготовлять миниатюрные сварные сильфоны с наружным диаметром до 3 мм, числом мембран до 20 и прогибом до 1 мм [53]. Мембраны для сварных миниатюрных сильфонов могут иметь как плоский, так и гофрированный профиль. В последнем случае снижается нелинейность и увеличивается допустимый прогиб. Мембраны изготавливают методом штамповки из листа, причем лучшие результаты дает штамповка резиной (в качестве матрицы используют специальную жесткую резину). Форма мембраны и ее размеры полностью определяются при этом методе только геометрией пуансона. Для изготовления миниатюрных сильфонов желательно использовать коррозионно-стойкий сплав 36НХТЮ, являющийся дисперсионно-твердеющим немагнитным сплавом с высокими механическими и упругими свойствами после термообработки.

Миниатюрные сильфоны можно изготавливать из нового прецизионного ниобиевого сплава 55ВТЮ. При сварке сильфонов центральные швы образуются конденсаторной сваркой, а периферийные — аргонодуговой сваркой с использованием специального приспособления для обкатки. На рис. 10 показана плоская мем-

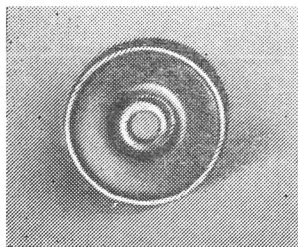


Рис. 10. Мембрана для миниатюрного сварного сильфона

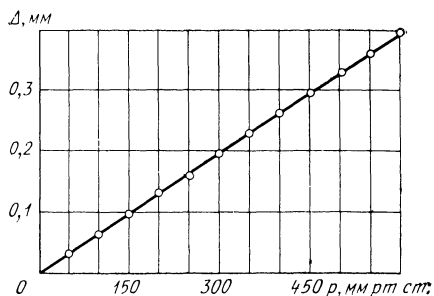


Рис. 11. Статическая характеристика сварного сильфона диаметром 4 мм с 14 мембранами

брана для миниатюрных сильфонов наружным диаметром 4 мм. Такие мембраны выполняют из листа 36НХТЮ толщиной 0,02 мм. На рис. 11 приведены характеристики по давлению одного из сильфонов с 14 мембранами. Нелинейность сильфона не превышает 1% при прогибе до 0,4 мм

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАТЧИКОВ

1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ

Преобразователь, преобразующий физическую величину в электрический сигнал, принято называть чувствительным элементом [95, 27].

Разнообразность и противоречивость требований, предъявляемых к датчикам физических величин в различных условиях эксплуатации, определяют жесткие ограничительные условия к физическим явлениям, положенным в основу преобразования измеряемого или управляемого параметра в электрический сигнал.

К наиболее употребительным в настоящее время и перспективным следует отнести следующие типы чувствительных элементов датчиков: полупроводниковый пьезорезистивный, терморезисторный, емкостный, индуктивный, пьезоэлектрический, механотронный, химотронный, ультразвуковой, фотоэлектрический, гальваноманитный, оптический, струнный.

В настоящей работе рассматриваются лишь датчики с полупроводниковыми пьезорезистивными чувствительными элементами, терморезисторными, емкостными, пьезоэлектрическими, гальваноманитными и струнными.

Индуктивные чувствительные элементы получили достаточно широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Один из первых миниатюрных электроманометров с индуктивным чувствительным элементом был разработан Семеновым А. Г. в 1956 году [85], но в связи с малой надежностью этот датчик не получил широкого распространения. Сложность конструкции индуктивных чувствительных элементов, высокие требования, предъявляемые к применяемым магнитным материалам, точность изготовления, а также необходимость использования высокостабильных измерительных высокочастотных схем в значительной степени сдерживают развитие этого перспективного направления.

Электронные чувствительные элементы с механическими управляемыми электродами (механотроны) начали применяться в датчиках в основном в 50-х годах [104]. Однако нестабильность работы механотронов и высокая температурная чувствительность задерживали их внедрение. В настоящее время отечественной промышленностью разработано для серийного выпуска несколько типов механотронных преобразователей [11] с высокими метрологическими характеристиками (например, сверхминиатюрные механотроны $6M \times 1B$ и $6M \times 2B$).

Использование высокостабильных механотронов открывает новые возможности при разработках датчиков физических величин,

Электрохимические чувствительные элементы (химотроны) основаны на использовании электрохимических процессов, протекающих на электродах, погруженных в электролиты или полярные жидкости. В последние годы разрабатываются электрохимические элементы и приборы самого различного назначения: диоды, триоды, интеграторы, датчики механических и физических величин, управляемые резисторы, стабилизаторы макротоков, усилители постоянного тока, счетчики времени и др. [18, 100].

Химотронные элементы отличаются малым током потребления (в 100—1000 раз менее, чем полупроводниковые приборы) и высокой чувствительностью, которая позволяет в ряде случаев исключить из измерительных и управляющих систем усилительные устройства. Эти элементы наиболее перспективны для датчиков медленно изменяющихся давлений. Возможность миниатюризации, простота конструкции и дешевизна будут содействовать широкому распространению химотронов при конструировании различных самонастраивающихся и самообучающихся систем, они также станут одними из важнейших чувствительных элементов в бионике.

Ультразвуковые чувствительные элементы, основанные на использовании эффекта Допплера, широко используются в датчиках для измерения скорости кровотока. Впервые в мире этот метод для диагностических целей был применен у нас в стране [10, 38, 94]. В датчиках широкое применение нашли пьезоэлементы из цирконата титаната свинца (ЦТС)

Некоторые вопросы проектирования ультразвуковых датчиков рассмотрены в работе [22].

2. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Основные типы и характеристики тензометрических полупроводниковых чувствительных элементов. Высокая чувствительность полупроводниковых тензометрических чувствительных элементов (тензорезисторов), превышающая на два порядка чувствительность проволочных тензодатчиков, вызвала большой к ним интерес во всех развитых странах мира [16, 112, 114].

Независимо от типа тензорезистора, его материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) чувствительность тензорезистора, выраженная относительным изменением сопротивления, должна быть наибольшей;
- 2) общее сопротивление тензорезистора должно быть по возможности большим, с тем чтобы нежелательное влияние сопротивлений в измерительном контуре и их изменений было наименьшим (провода от аппаратуры, контакты и т. д.);
- 3) температурный коэффициент сопротивления (ТКС) должен быть наименьшим;
- 4) в контактах тензорезистора должен отсутствовать термоэлектрический эффект;
- 5) материал тензорезистора должен обладать в возможно более широком диапазоне линейной зависимостью между относительной деформацией и изменением сопротивления.

Чувствительность полупроводниковых тензорезисторов (ПТ) в основном определяется изменением их удельного сопротивления под действием механического напряжения. В наиболее про-

стом случае механические напряжения, компоненты электрического поля и плотности тока действуют в одном и том же продольном (относительно кристалла тензорезистора) направлении. Если R_0 — продольное сопротивление недеформированного кристалла, ΔR — изменение этого сопротивления под действием продольного напряжения σ , то

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi_1 \sigma, \quad (53)$$

где π_1 — коэффициент продольного пьезосопротивления.

Области энергии кристалла состоят из нескольких эквивалентных энергетических минимумов. Приложение одноосного напряжения вызывает изменение ориентации минимумов, в результате этого зарядоносители перераспределяются. Так как зарядоносители обладают различной подвижностью на разных уровнях, то средняя подвижность зарядов изменяется и вызывает изменение удельного сопротивления, в этом и заключается принцип работы ПТ.

Коэффициент тензочувствительности ПТ

$$S = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon} = \pi_1 E, \quad (54)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ — относительное изменение длины ПТ; E — модуль продольной упругости материала ПТ.

Коэффициент тензочувствительности у ПТ высок ($S=50 \div 150$): на два порядка выше, чем у металлических тензорезисторов; в этом и заключается одно из основных положительных свойств ПТ. Коэффициент тензочувствительности приклеенных на упругий элемент тензорезисторов меньше, чем у тензорезисторов в свободном состоянии, за счет влияния переходного слоя клея. Распределение деформации в приклеенном тензорезисторе показано на рис. 12.

Большинство выпускаемых ПТ изготовляют из кремния. Изменение коэффициента тензочувствительности кремния в зависимости от ориентации и величины удельного сопротивления показано на рис. 13; наибольшей чувствительностью обладает слабо легированный кремний (111) p -типа и (100) n -типа.

Кристаллы ПТ, используемых на практике, обычно легируются до величины удельного сопротивления от 0,02 до 0,2 Ом·см. Пластины ПТ вырезают из монокристалла кремния, шлифуют и затем вытравливают до получения необходимой толщины (0,03—0,05 мм) или получают вытягиванием из переохлажденного полупроводникового расплава (дендриты германия и кремния) [4]. ПТ можно также получать кристаллизацией из паров кремния, при этом они приобретают нитевидную форму [84].

При изготовлении полупроводниковых тензорезисторных чувствительных упругих элементов имеет перспективу использование современных технологических процессов полупроводниковой техники (диффузионного, автоэпитаксиального и гетероэпитаксиального). При этом отпадает необходимость использования клея и исчезает связанная с ним ползучесть. При диффузионной технологии тензорезисторы образуются диффузией выбранной примеси в тонкий слой поверхности упругого элемента (мембраны, балки), выполнен-

ного из монокристаллического кремния с высоким удельным сопротивлением или противоположной проводимости для создания изолированного p - n -перехода [23].

При автоэпитаксиальной технологии тензорезистор образуется наращиванием монокристаллического слоя полупроводника, кристал-

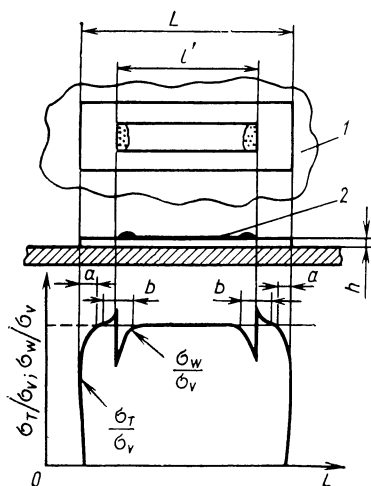


Рис. 12. Распределение деформаций в приклеенном тензорезисторе:

1 — упругий элемент; 2 — тензорезистор; σ_T — деформация в слое клеящего вещества; σ_w — деформация в тензорезисторе; σ_v — деформация в упругом элементе

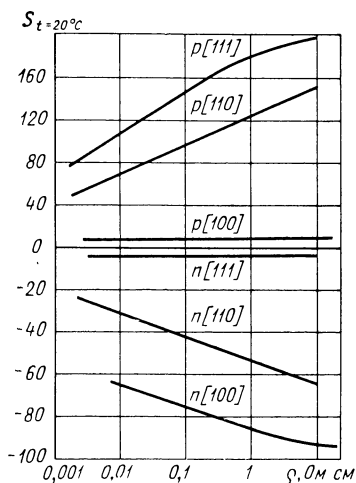


Рис. 13. Изменение коэффициента тензочувствительности в зависимости от удельного сопротивления и ориентации кристалла (при комнатной температуре)

лическая решетка которого является продолжением кристаллической решетки упругого элемента, выполненного из полупроводникового материала того же типа, что и наращиваемый слой. Изоляция тензорезистора от массы упругого элемента здесь также осуществляется p - n -переходом.

При гетероэпитаксиальной технологии тензорезистор образован наращиванием монокристаллического слоя полупроводника на поверхности упругого элемента, выполненного из монокристаллического диэлектрика (например, сапфира). Здесь также кристаллическая решетка тензорезистора является продолжением кристаллической решетки поверхности упругого элемента, но иной кристаллографической системы [35].

Упругие тензорезисторные элементы, выполненные по гетероэпитаксиальной технологии, имеют ряд преимуществ, главными из которых являются высокое сопротивление изоляции, большая механическая прочность, технологичность, высокая надежность и более широкий диапазон рабочих температур.

Приращение сопротивления кремниевых тензорезисторов описывается уравнением

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{H_1}{T} \sigma + \frac{H_2}{T^2} \sigma^2 + \frac{H_3}{T^3} \sigma^3, \quad (55)$$

где T — абсолютная температура, H_1 , H_2 , H_3 — константы.

Экспериментально найдено [112], что для кремния с $\rho = 0,1$ Ом·см

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 120 \varepsilon + 4000 \varepsilon^2 \text{ для } p\text{-типа}; \quad (55a)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = -110 \varepsilon + 10\,000 \varepsilon^2 \text{ для } n\text{-типа}.$$

Из этих уравнений следует, что линейность в пределах 1% (что требуется для большинства датчиков) обеспечивается только при относительных деформациях $\varepsilon = \pm 300 \cdot 10^{-6}$ (p -тип) и $\varepsilon = \pm 100 \cdot 10^{-6}$ (n -тип), тем самым значительно ограничивается чувствительность для ПТ. Также видно, что ПТ p -типа имеет более линейную характеристику при растяжении, а n -типа — при сжатии (рис. 14).

«Кажущаяся» деформация является следствием различия величин коэффициентов линейного расширения материала тензорезистора и упругого элемента (мембраны, балки), с которым он связан. Уход нуля при изменении температуры определяется зависимостью

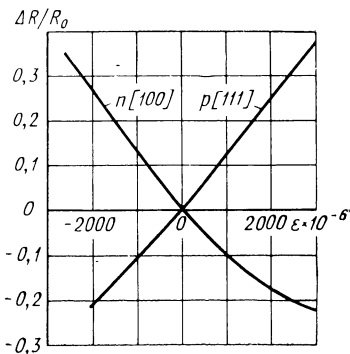


Рис. 14. Изменение сопротивления кремния при деформации

$$\frac{\Delta R}{R_0 \Delta t} = \beta + S (\alpha'_t - \alpha''_t), \quad (56)$$

где β — температурный коэффициент сопротивления тензорезистора (ТКС); α'_t — коэффициент линейного расширения упругого элемента; α''_t — коэффициент линейного расширения тензорезистора.

Для ПТ p -типа, имеющих положительный коэффициент тензочувствительности S , эта зависимость обычно положительна (коэффициенты линейного расширения большинства металлов и сплавов выше, чем у кремния, $\alpha_t^{\text{Si}} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$) и дрейф нуля высок. Отрицательный коэффициент тензочувствительности кремния n -типа позволяет сделать члены правой части уравнения близкими

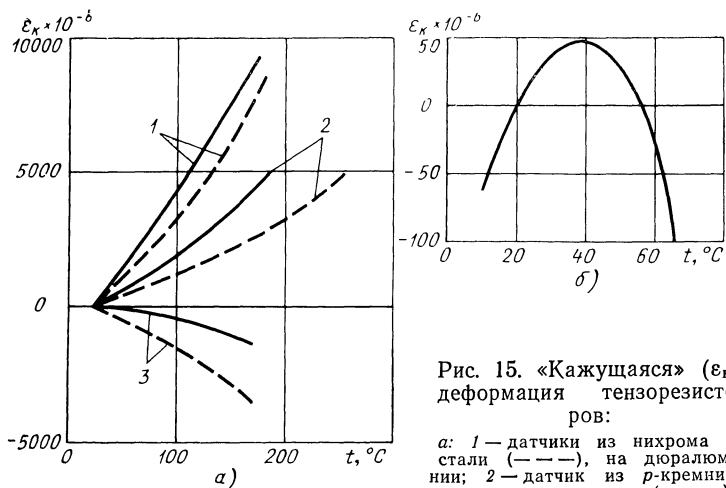


Рис. 15. «Кажущаяся» (ϵ_k) деформация тензорезисторов:

а: 1 — датчики из нихрома на стали (— — —), на дюралюминии; 2 — датчик из p -кремния на алюминии, на стали (— — —); 3 — датчики из эдванса на дюралюминии, на стали (— — —); б: кажущаяся деформация самокомпенсированных n -кремниевых датчиков на стали

по величине и противоположными по знаку, при этом дрейф нуля резко снижается (рис. 15).

Значительный интерес представляет изготовление упругих элементов датчиков из кварца. Высокие упругие и изоляционные свойства кварца в сочетании с малой величиной коэффициента линейного расширения ($\alpha_t = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) снижают кажущуюся деформацию и ползучесть приклеенного ПТ, так как толщина слоя клея, учитывая высокие изоляционные свойства кварца, может быть доведена до минимума (5—10 мкм). Перспективен также тензорезисторный чувствительный элемент, в котором упругий элемент (мембрана, балка, нить) выполнен из кварца, а кремниевый нитевидный тензорезистор с платиновыми токопроводами (разработка ЛПИ, г. Львов) вплавлен в поверхность упругого элемента низкотемпературной ($t_{\text{плав}} = 300 \div 350^{\circ}\text{C}$) свинцовистой стеклоэмалью [54]. Близость коэффициентов линейного расширения кварца и эмали позволяет образовать спай с высокими упругими свойствами, отличающийся стабильностью и малой величиной ползучести ($\sigma_n < 0,5\%$).

Ползучесть. Под ползучестью понимают способность тензорезисторов изменять свое сопротивление при неизменной, отличной от нуля деформации. Кристаллы ПТ свободны от ползучести и гистерезиса. Однако модуль продольной упругости кремния велик ($E = 1,9 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$) и поперечное сечение кристалла сравнительно велико для обычных ПТ (порядка $20 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$), поэтому при деформации возникают значительные напряжения сдвига в связующем слое клея и ползучесть ПТ обычно превышает ползучесть проволоочных тензорезисторов, у которых величина сечения проволоки значительно меньше, чем у тензорезисторов. Ползучесть определяется выражением

$$\sigma_n = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_n - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_k}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_n} 100\% =$$

$$= \frac{\frac{R_1 - R_{01}}{R_{01}} - \frac{R_2 - R_{02}}{R_{02}}}{\frac{R_1 - R_{01}}{R_{01}}} 100\%, \quad (57)$$

где R_{01} ; R_1 ; R_2 ; R_{02} — сопротивления тензорезистора до нагружения, после нагружения, после выдержки под нагрузкой, после выдержки без нагрузки соответственно.

Исследования дают следующие значения ползучести за 1 час ПТ с базой 3 мм, наклеенной на стальную балку: 1) клей ВЛ931, $\sigma_n = 1 \div 1,5\%$; 2) клей БФ-2, $\sigma_n \approx 1,5\%$; 3) эпоксидный компаунд Д-86, $\sigma_n = 3 \div 4\%$; 4) циакрин, $\sigma_n \approx 5\%$. Величина ползучести после первого часа измерений изменяется незначительно.

Ресурс работы тензорезисторов. Исследования показывают, что один миллион колебаний с относительной деформацией $\pm 2000 \cdot 10^{-6}$ вызывает уменьшение чувствительности приклеенного тензорезистора на величину порядка 2%.

Схемы включения тензорезисторов. Основные схемы включения ПТ в настоящее время — потенциометрическая и мостовая. Потенциометрическую схему (рис. 16, а) применяют в тех случаях,

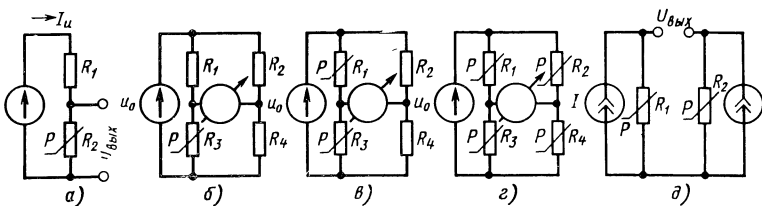


Рис. 16. Основные схемы включения полупроводниковых тензорезисторов:

а — потенциометрическая; б, в, г — мостовая с одним, двумя, четырьмя тензорезисторами соответственно; д — схема с питанием от источника тока

когда необходимо выделить переменную составляющую. Напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое с R_2 , определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0 R_2}{R_2 + R_1}. \quad (58)$$

При помощи мостовых схем измеряют как статические, так и динамические деформации. Мостовые схемы работают как на постоянном, так и на переменном токе. Мосты постоянного тока балансируются по активному сопротивлению, например, перемеще-

нием подвижного контакта реохорда или с помощью балансировочных сопротивлений. Мосты переменного тока необходимо также балансировать по реактивной составляющей, для чего в диагональ питания подключается балансировочный конденсатор. Если U — напряжение источника стабилизированного напряжения и все сопротивления по величине равны $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ (рис. 16, з), то

$$U_p = U \frac{\Delta R}{4R} \left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right), \quad (59)$$

где U_p — напряжение разбаланса (напряжение на выходе схемы); ΔR — изменение сопротивления тензорезистора при деформации.

В металлических тензорезисторах относительные деформации не превышают $5 \cdot 10^{-3}$ и при коэффициенте тензочувствительности $S=2$ величина $\frac{\Delta R}{2R} \leq 0,5\%$, поэтому для практических целей имеем

$$U_p = U \frac{\Delta R}{4R}. \quad (60)$$

При применении ПТ большие изменения сопротивления нарушают линейность моста; здесь при относительной деформации $1 \cdot 10^{-3}$ величина $\frac{\Delta R}{R} \approx 13\%$ (для $S=130$) и нелинейность больше 6%.

Линейность улучшается при применении источника питания постоянного тока с высоким внутренним сопротивлением. Тогда $U_p = \frac{I}{4} \Delta R \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right)$, т. е. нелинейность уменьшается в 2 раза. Хорошие результаты дает применение моста с постоянным напряжением питания, но с большим отношением плеч, т. е. $R_1=R_3=R$; $R_2=R_4=KR$; $K \geq 1$, здесь

$$U_p = \frac{U}{K} \frac{\Delta R}{R} \left(1 - \frac{\Delta R}{KR}\right). \quad (61)$$

Однако при этом необходимо увеличивать напряжение питания. Рассмотренное касается случая с одним активным тензорезистором. Задача значительно упрощается при использовании двух или четырех активных тензорезисторов (рис. 16, в, з). Если изменения их сопротивлений будут равны и противоположны по знаку, то тензорезисторы могут быть включены в обычную мостовую схему с источником постоянного напряжения. Равные и противоположные по знаку изменения сопротивлений могут быть получены при положительных и отрицательных деформациях, что конструктивно легко получить, например, наклеиванием тензорезисторов с противоположных сторон мембраны или балки. Сочетая тензорезисторы p - и n -типов, можно получить мост с двумя или четырьмя активными плечами при деформациях одного знака.

Использование двух или четырех активных тензорезисторов увеличивает чувствительность датчика теоретически в 2 или 4 раза соответственно, кроме того, при этом происходит непосредственная (прямая) температурная его компенсация. Прямая температурная компенсация в связи с разбросом величин сопротивлений, ТКС,

ТКЧ (температурный коэффициент изменения чувствительности) у тензорезисторов, как правило, не обеспечивает допустимую температурную погрешность датчика. Используют схемную температурную компенсацию, например шунтирование активного тензорезистора с большим значением ТКС, при этом снижается температурная погрешность. Величину шунтирующего сопротивления устанавли-

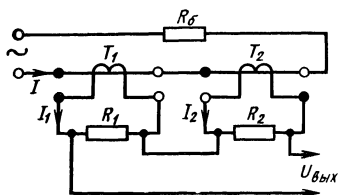


Рис. 17. Дифференциальная схема переменного тока

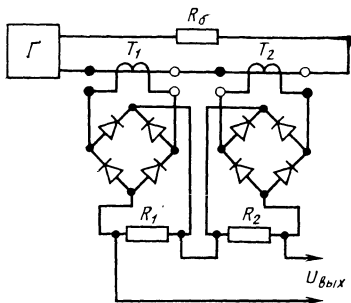


Рис. 18. Дифференциальная схема постоянного тока

вают экспериментальным путем. Однако при этом уменьшается чувствительность датчика в целом (обычно на 2—10%). Для измерений при больших изменениях температур ($\Delta t > 20^\circ\text{C}$) можно использовать включение термистора в диагональ питания моста, находящегося при той же температуре, что и тензорезисторы.

Дифференциальные измерительные схемы ПТ на трансформаторах тока разработаны в последние годы [74].

Эти схемы обладают рядом преимуществ, главные из которых — линейность выходного сигнала, повышенная чувствительность по напряжению и сниженная температурная погрешность. Схемы могут быть выполнены как на переменном, так и на постоянном токе. Дифференциальная схема переменного тока показана на рис. 17. Уравнение выходного напряжения имеет вид

$$U_{\text{вых}} = I_1 R_1 - I_2 R_2 = I (V_1 R_1 - V_2 R_2), \quad (62)$$

где I — первичный ток трансформаторов; I_1 и I_2 — вторичный ток трансформаторов T_1 и T_2 соответственно; V_1 и V_2 — коэффициенты трансформации (равны отношению вторичного тока трансформатора к первичному).

Дифференциальная схема постоянного тока показана на рис. 18. Схема питается от генератора G переменного тока прямоугольной формы. ПТ R_1 и R_2 включаются во вторичные обмотки трансформаторов тока T_1 и T_2 через выпрямительные мосты таким образом, что падения напряжения на них вычитаются. Напряжение выходного сигнала определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = I (V_1 K_{B1} R_1 - V_2 K_{B2} R_2), \quad (63)$$

где K_{B1} и K_{B2} — коэффициенты выпрямления выпрямительных мостов, включенных во вторичные цепи трансформаторов тока T_1 и T_2 .

В дифференциальных измерительных системах ПТ на трансформаторах тока выходное напряжение зависит от абсолютного изменения сопротивления ΔR тензорезистора, тем самым снижается температурная погрешность (ТКС тензорезистора, равный

$$\frac{dR}{R_0} \frac{1}{\Delta t} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}, \text{ положителен ТКС} = \frac{dS}{S_0} \frac{1}{\Delta t} \text{ } 1/^{\circ}\text{C} \quad \text{отри-}$$

цателен; оба коэффициента у кремниевых ПТ — величины одного порядка, поэтому абсолютное сопротивление R тензорезистора в значительно меньшей степени зависит от изменения температуры,

чем относительное сопротивление $\frac{\Delta R}{R}$, которое определяет величину выходного напряжения в мостовых схемах). На рис. 19 приведены кривые чувствительности мостовой и дифференциальной схем включения ПТ.

При разработке миниатюрных тензорезистивных датчиков механических и физических величин, например датчиков давления

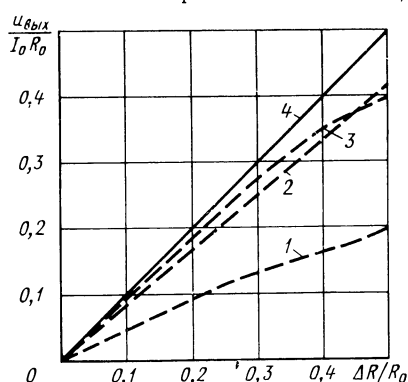


Рис. 19. Чувствительность мостовой и дифференциальных схем:

1, 2 — мостовые схемы; 3, 4 — дифференциальные схемы

[49], необходимо учитывать увеличенные значения тепловых сопротивлений между ПТ и окружающей средой, в связи с малыми размерами и массами упругих чувствительных элементов (мембран, балок и т. д.). В этих случаях, как правило, не могут быть реализованы номинальные значения рабочих токов через ПТ (например, для малогабаритного ПТ типа Ю-8 рабочий ток по паспортным данным составляет ~ 10 мА) из-за их перегревов (десятки градусов) и больших градиентных температур вдоль и поперек ПТ и клеевого слоя подложки.

В результате этого возникают значительные термо-ЭДС (до единиц милливольт), что существенно затрудняет термокомпенсацию датчика и ухудшает его метрологические характеристики. Установлено, что для миниатюрных датчиков (диаметр 3—4 мм; толщина упругого элемента 0,05—0,07 мм) с полупроводниковыми ПТ типа Ю-8 величина рабочего тока, протекающего через каждый тензорезистор, не должна превышать 2—3 мА. Такое снижение номинальных значений рабочих токов приводит к резкому падению чувствительности датчиков и затрудняет использование известных схем включения ПТ.

Рассматриваемая схема [55] с питанием от генератора переменного тока повышенной частоты с использованием дифференциального трансформатора в качестве пассивных плеч моста (рис. 20) и для согласования с нагрузкой не имеет этих недостатков. Здесь, благодаря значительной индуктивной связи между обмотками w_1 и w_2 при равных токах I_1 и I_2 , результирующий магнитный поток

в сердечнике трансформатора равен нулю и вследствие этого равно нулю напряжение на любых обмотках трансформатора; при незначительных разбалахах моста на обмотках трансформатора возникают небольшие по величине напряжения, что делает схему нечувствительной к паразитным шунтирующим реактивным сопротивлениям (например, C_1 и C_2) и позволяет применять достаточно

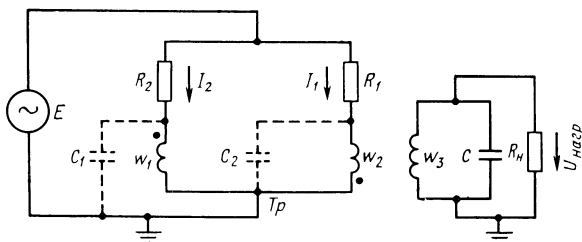


Рис. 20. Схема включения тензорезисторов с дифференциальным резонансным трансформатором

длинные (до 4 м) провода, соединяющие ПТ со схемой, при относительно высокой частоте напряжения питания (до 100 кГц).

Настройка выходной обмотки w_3 при помощи конденсатора C в резонанс с частотой генератора снижает требования к конструкции трансформатора (уменьшает необходимые значения индуктивностей обмоток w_1 ; w_2 и w_3), а также исключает вносимый нерезонансным трансформатором фазовый сдвиг, что в дальнейшем упрощает фазочувствительное детектирование.

Работа схемы описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E &= (R_0 - \Delta R) I_1 + R_n \left(\frac{w_2}{w_3} \right)^2 (I_1 - I_2); \\ E &= (R_0 + \Delta R) I_2 + R_n \left(\frac{w_2}{w_3} \right)^2 (I_1 - I_2), \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

где предполагается, что $R_1 = R_0 - \Delta R$; $R_2 = R_0 + \Delta R$, $w_1 = w_2$ и КПД трансформатора $\eta = 1$.

Решение этой системы дает для разностного тока $\Delta I = I_1 - I_2$

$$\Delta I = E \frac{2\Delta R}{R_0^2 - \Delta R^2 + 2R_0 \left(\frac{w_2}{w_3} \right)^2 R_n},$$

а для напряжения на нагрузке

$$U_n = E \frac{2\Delta R}{R_0^2 - \Delta R^2 + 2R_0 \left(\frac{w_2}{w_3} \right)^2 R_n} \frac{w_2}{w_3} R_n. \quad (65')$$

Считая $\Delta R \leq R_0$ и исследуя U_n как функцию от $\frac{w_2}{w_3}$ на максимум, получаем обычное условие оптимального согласования:

$$R_0 = 2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_3} \right)^2 R_H,$$

отсюда

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_3} \right)_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_0}{2R_H}}.$$

Подставляя значение $\left(\frac{\omega_2}{\omega_3} \right)_{\text{опт}}$ в выражение (65'), имеем

$$\begin{aligned} U_H &= E \frac{2\Delta R}{2R_0^2 - \Delta R^2} \sqrt{\frac{R_0 R_H}{2}} = \\ &= E \sqrt{\frac{R_0 R_H}{2}} \frac{\Delta R}{R_0^2 \left[1 - 0,5 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \right]} \approx \\ &\approx E \frac{\Delta R}{R_0} \sqrt{\frac{R_H}{2R_0} \left[1 + 0,5 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \right]}. \end{aligned} \quad (65)$$

Из последнего выражения получаем для коэффициента нелинейности

$$K_H = 0,5 \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2$$

и для оценки максимального выходного напряжения

$$U_{H \max} \approx E \frac{\Delta R_{\max}}{R_0} \sqrt{\frac{R_H}{2R_0}}. \quad (66)$$

При типовых параметрах датчика имеем следующие величины: $R_0 = 100$ Ом; $\Delta R_{\max} = 5$ Ом; $R_H = 10$ кОм; $E = 0,2$ В; $I_0 = 2$ мА. Тогда

$$U_{H \max} = 0,2 \frac{5}{100} \sqrt{\frac{10000}{2 \cdot 100}} \approx 0,07 \text{ В}$$

при нелинейности схемы, не превышающей 0,13%.

Следует отметить, что термокомпенсация нуля схемы осуществляется включением компенсирующего сопротивления последовательно с тем из тензорезисторов, у которого R_0 быстрее изменяется с температурой.

Подбором величины компенсирующего сопротивления удастся получить термостабилизацию нуля с погрешностью не хуже 1% в диапазоне температур до 20°C. Отмечалось также уменьшение гистерезиса датчика до 1—2% по сравнению с исходным 2—4%. Вероятно, последний эффект объясним уменьшением температурных градиентов в клеевом слое.

На рис. 21 изображен один из практически используемых вариантов схемы включения тензорезисторов в датчике давления с элементами установки и термостабилизации нуля.

Невысокий коэффициент нелинейности схемы (порядка $0,5 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2$) реализуется только при условии равенства $R_{д1} = R_{д2}$ и $\Delta R_1 = \Delta R_2$, т. е. в случае полной симметрии плеч датчика. При нарушении этой симметрии (из-за неудачного подбора

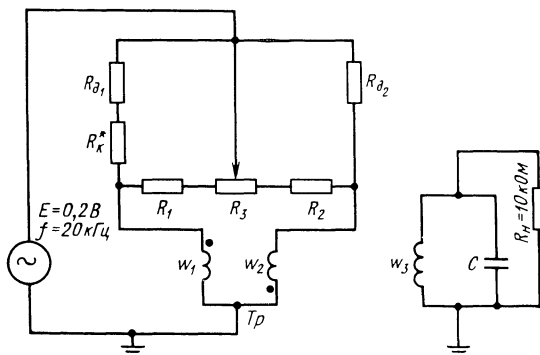


Рис. 21. Схема включения тензорезисторов в датчике давления с элементами установки и термостабилизации нуля:

$R_{д1}$ и $R_{д2}$ — тензорезисторы типа Ю-8; $R_{д1} \approx R_{д2} \approx 100$ Ом; R_k^* — термостабилизирующее сопротивление, включается последовательно $R_{д1}$ или $R_{д2}$; $R_k^* = 30 \div 50$ Ом; R_1, R_2, R_3 — образует цепь балансировки нуля, $R_1 = R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 1$ кОм; дифференциальный трансформатор Tr выполнен на ферритовом кольце $K = 20 \times 12 \times 6$ из феррита 2000 ГсМ, $w_1 = w_2 = 20$ витков, $w_3 = 140$ витков, $C = 3,3$ тыс. пФ

тензорезисторов или при необходимости вводить большое по величине термостабилизирующее сопротивление R_k , сравнимое с сопротивлением $R_{д}$ датчика) коэффициент нелинейности схемы возрастает и стремится (при обрыве одного из плеч датчика) к величине нелинейности приращения тока в работающем плече, т. е.

$$K_{н \max} = 0,25 \frac{\Delta R_{\max}}{R}. \quad (67)$$

Таким образом, схема включения тензорезисторов с дифференциальным резонансным трансформатором имеет большую чувствительность по сравнению с мостовой схемой (для рассматриваемой цепи $U_{н \max} = 0,07$ В, а для мостовой схемы $U_{н \max} = 2 \Delta R I_0 = 0,02$ В при $I_0 = 2$ мА).

Это позволяет значительно облегчить режим работы тензоэлементов (снизить ток через тензоэлемент до 2 мА) и тем самым уменьшить величину ползучести, дрейфа нуля, гистерезиса без существенной потери выходного напряжения по сравнению с мостовой схемой и схемой с трансформаторами тока.

При этом коэффициент нелинейности схемы не превышает 1% вплоть до нагрузок, определяемых

$$\frac{\Delta R}{R} = 10\%.$$

Германиевые дендритные чувствительные элементы и технологии их изготовления. Изготовление дендритных ленточных кристаллов германия методом вытягивания из расплава, переохлажденных ниже определенной критической точки, открывает новые возможности при конструировании ПТ (гедисторов), а также чувствительных элементов для измерения температуры [20, 56, 57, 58]. Высокая чувствительность гедисторов ($S=50\div 100$) позволяет в ряде случаев использовать их без специальной усилительной аппаратуры. Высокие упругие свойства и механическая прочность дендритной ленты дают возможность многократно наклеивать один и тот же гедистор в процессе предварительной тарировки и, таким образом, достаточно точно определять коэффициент тензочувствительности образцов. Основное преимущество гедисторов заключается в простоте и технологичности [56] их изготовления. Гедисторы изготавливают разрезанием ленты-заготовки корундовой иглой на отрезки требуемой длины и последующим нанесением на их торцы омических контактов.

Ленту-заготовку помещают на лист плотной бумаги и прижимают его к ней тонкой линейкой из органического стекла на заданном расстоянии от торца. Линию отреза намечают (по шаблону) корундовой иглой ГОСТ 7765—70, вставленной в рукоятку, после чего ленту помещают на металлический брусок с прямоугольным краем. Совмещая грань бруска с линией отреза и легко нажимая на отрезок через оргстекло, отламывают пластину дендрита. Хранить нарезанные пластины по припайки токоподводов рекомендуется не более 24 ч. Можно резать пластины и вдоль ленты, используя в качестве инструмента алмаз. Нарезку пластин при серийном производстве необходимо производить в специальном приспособлении пенального типа с соответствующими ограничениями и прижимами.

Для припайки токоподводов можно использовать устройство (рис. 22), содержащее фторопластовую планку 1 толщиной 5—6 мм с нагревателем 2, выполненным в виде спирали из нихромовой проволоки диаметром 0,4—0,6 мм (нагреватель располагается в выфрезерованном пазе планки 1). Токоподвод гедисторов натягивают между двумя откидывающимися пружинами 3, на концах которых намотаны два-три витка ленты 4 из лейкопластыря (для исключения скольжения натянутого токоподвода).

Пластину из дендрита германия прижимают к планке 1 при помощи откидывающего прижима 7 с накладкой из фторопласта.

Для пайки контактов пластин р-типа используются следующие припои: 90% Pb и 10% In (индий), причем температура плавления должна составлять примерно 300°C; при 95% Sn и 5% In $t_{пл} \approx 220^\circ\text{C}$.

Для пайки пластин n -типа используют припой состава: 95% Sn и 30% Sb (сурьма), при этом $t_{пл} \approx 225^\circ\text{C}$. В качестве флюса в обоих случаях используют насыщенный водный раствор хлористого цинка. Напряжение питания нагревателя должно составлять 8—12 В переменного тока. Сопротивление гедисторов измеряют с помощью моста постоянного тока, при том удобно применять

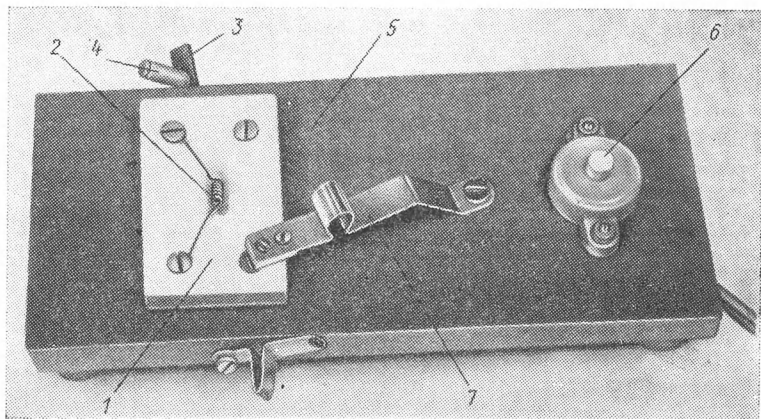


Рис. 22. Приспособление для припайки токоподводов к гедисторам:

1 — фторопластовая планка; 2 — нагреватель; 3 — откидывающаяся пружина; 4 — лейкопластырь; 5 — основание; 6 — кнопка включения; 7 — прижим

зажимы с плоскими губками (доработка зажима типа «крокодил»). Изменение сопротивления гедисторов при перемене полярности не должно превышать 0,3%. Необходимо также для каждого гедистора снимать вольт-амперную характеристику с определением ее линейности. Допустимая нелинейность 3%.

Основные характеристики германиевых дендритных ПТ и технология их изготовления приведены в работе [56].

Характеристики миниатюрных кремниевых тензорезисторов гантельного типа. Для конструирования миниатюрных датчиков (например, внутриволостных датчиков давления крови) необходимы малобазные ПТ (с базой не более 2 мм).

В период 1970—71 гг. один из заводов совместно с ОКБ БИМК ЛЭТИ проводили исследовательские и технологические разработки малобазных ПТ повышенной стабильности. В результате этих работ была создана технология серийного производства тензорезисторов типа Ю-8 с базой 2 мм гантельного типа.

Эта технология предусматривает использование важнейшего технологического приема современной микроэлектроники — фотолитографии. Указанный прием включает процессы получения изоб-

ражения на фотошаблоне, затем на слое фоторезистора и, наконец, травлением или осаждением на специальной подложке.

Использование фотолитографии с последующей химической резкой значительно снижает возможность появления скрытых дефектов в ПТ и повышает их стабильность. Прогрессивность применяемой технологии также заключается в том, что она обеспечивает серийное изготовление миниатюрных ПТ сложных конфигураций (например, ПТ гантельного типа), что снижает ползуемость благодаря более оптимальным условиям приклеивания. Тензорезисторы типа Ю-8 имеют защитный изоляционный слой (пленку), что резко повышает сопротивление изоляции ПТ в датчике и со-

Таблица 6

Основные характеристики миниатюрных ПТ типа Ю-8

Тип ПТ	Номинальное сопротивление, Ом	Номинальный рабочий ток, мА	Тип проводимости	Коэффициент чувствительности ($t=20 \pm 5^\circ \text{C}$, $\varepsilon=0,1\%$)	ТКС от -15 до $+70^\circ \text{C}$, $\%/^\circ \text{C}$
Ю-8А-1	$110 \pm 1\%$	10	<i>p</i>	100 ± 10	0,3
Ю-8А-2	$162 \pm 1\%$	10	<i>p</i>	100 ± 10	0,3
Ю-8А-3	$220 \pm 1\%$	10	<i>p</i>	100 ± 10	0,3
Ю-8Б-1	$90 \pm 1\%$	10	<i>n</i>	100 ± 10	0,3
Ю-8Б-2	$138 \pm 1\%$	10	<i>n</i>	100 ± 10	0,3
Ю-8Б-3	$180 \pm 1\%$	10	<i>n</i>	100 ± 10	0,3

Продолжение табл. 6

Тип ПТ	ТКС от -15 до $+70^\circ \text{C}$, $\%/^\circ \text{C}$	Изменение сопротивления ПТ при перемене полярности, %, не более	Нелинейность вольт-амперной характеристики от $+15$ до $+70^\circ \text{C}$, %	$\varepsilon_{\text{доп}}$, %	Срок службы при $\varepsilon=0,1\%$, циклов, не менее	$I_{\text{доп}}$, мА
Ю-8А-1	0,25	± 1	± 1	0,3	10^6	100
Ю-8А-2	0,25	± 1	± 1	0,3	10^6	100
Ю-8А-3	0,25	± 1	± 1	0,3	10^6	100
Ю-8Б-1	0,4	± 1	± 1	0,3	10^6	100
Ю-8Б-2	0,4	± 1	± 1	0,3	10^6	100
Ю-8Б-3	0,4	± 1	± 1	0,3	10^6	100

действует улучшению стабильности и надежности датчика в целом.

Основные характеристики миниатюрных ПТ типа Ю-8 даны в табл. 6. Здесь в графе «срок службы» указана цифра 10^6 циклов. Эта величина, гарантируемая заводом-изготовителем, значительно занижена.

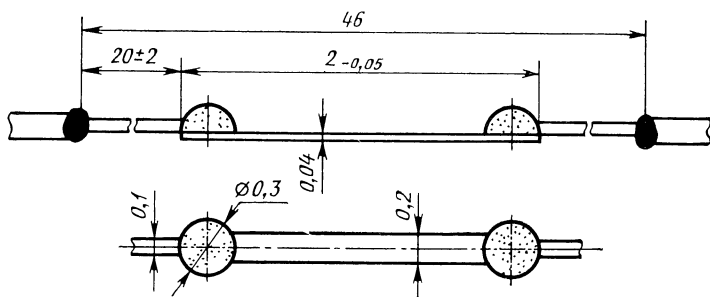


Рис. 23. Общий вид полупроводникового малогазного тензорезистора типа Ю-8.

Проведенные исследования показали, что ПТ типа Ю-8, наклеенные на стальную балку клеем ВЛ-931, надежно выдерживают 10^7 циклов при деформации $\epsilon = 1\%$. Снижение чувствительности приклеенных ПТ не превышало $1,5\%$. Общий вид тензорезистора Ю-8 показан на рис. 23.

Температурные характеристики чувствительных элементов из монокристаллического германия и кремния. При разработке и конструировании миниатюрных датчиков с полупроводниковыми тензорезисторами возникают значительные трудности в достижении приемлемой температурной погрешности. Известен ряд методов температурной компенсации ПТ [76], но наиболее простым из этих методов является включение двух или четырех ПТ в смежные плечи моста, что обеспечивает компенсацию влияния температурных изменений сопротивлений ПТ на выходной сигнал. Такой способ компенсации назван прямым (компенсация первого рода).

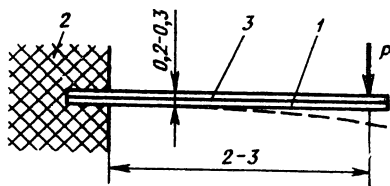


Рис. 24. Чувствительный элемент:
1 — тензорезистор; 2 — заделка; 3 — клей, стекломаль

Применительно к миниатюрным датчикам в некоторых случаях целесообразна механическая схема чувствительного элемента, показанная на рис. 24 [60, 61]. Здесь два связанных между собой ПТ 1 образуют консольную балку, являющуюся одновременно упругим элементом датчика. Сопротивление ПТ, как известно, зависит от абсолютной температуры T , удельного сопротивления полупроводникового материала ρ , продольного сопротивления ненапряженного тензоэлемента R_0 , продоль-

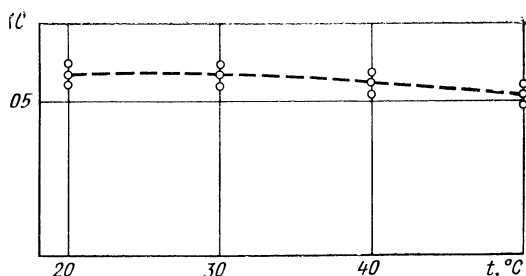


Рис. 25. Зависимость температурного коэффициента сопротивления ТКС кремниевых тензорезисторов ($\rho \approx 0,35 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) от температуры

ного напряжения σ и геометрических размеров. Если эти величины у обоих ПТ строго равны между собой, то их включение по схеме прямой компенсации должно привести к полной независимости выходного сигнала датчика от температуры. В миниатюрных датчиках с чувствительным элементом в виде упругой консольной балки добиться равенства температур ПТ удается, как правило, конструктивным путем.

Равенство R_0 и геометрических размеров достигается технологическими средствами. Если тензоэлементы выполнены из дендритной ленты германия, то можно уравнивать сопротивление ρ с точностью до 0,5% подшлифовкой торца одного из тензоэлементов на высокооборотном карборундовом круге малого диаметра. В остальных случаях равенство сопротивлений достигается в основном подбором тензоэлементов.

В кремниевых монокристаллических ПТ одной технологической партии (разработка ЛЭТИ, Ленинград) температурные коэффициенты сопротивления ТКС имеют равные значения с разбросом, не превышающим 1—2% (рис. 25).

При включении указанных тензоэлементов по прямой схеме компенсации и проведении эксперимента в жидкостной ванне (что создает диффузное температурное поле) наблюдается практически полная температурная компенсация (рис. 26). Однако после склеи-

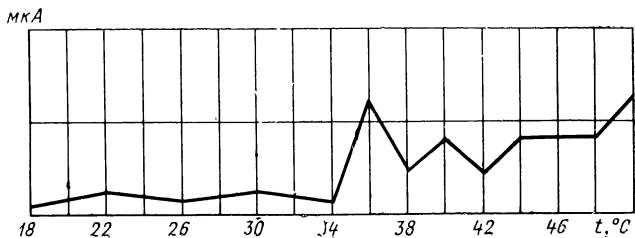


Рис. 26. Температурная расбалансировка моста с кремниевыми тензоэлементами (сопротивления составляют 236,60 и 239,61 Ом)

вания ПТ температурная компенсация нарушается (рис. 27) из-за многих причин, главная из которых — неравномерные натяжения в склеенном шве.

Технология склеивания ПТ в значительной степени определяет способность полученного чувствительного элемента к прямой температурной компенсации.

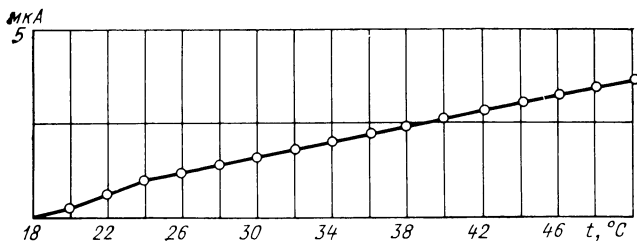


Рис. 27. Температурная разбалансировка моста со склеенным чувствительным элементом (сопротивления составляют 238,71 и 241,41 Ом; клей марки Д-86)

С уменьшением толщины прослойки клея качество чувствительного элемента возрастает. Использование прокладок из папиросной бумаги нежелательно. Лучшие результаты дает склеивание ПТ в два приема: предварительное покрытие поверхности тензоэлементов разбавленным клеем с отверждением и собственно склеивание с использованием миниатюрных струбцин и фторопластовых прокладок. При этом толщина слоя клея после его отверждения не должна превышать 0,02—0,03 мм.

При изготовлении ПТ из дендритной ленты германия одной технологической партии температурные коэффициенты сопротивления ТКС имеют более высокий разброс значений, чем кремниевые ПТ, и могут достигать 2—3%. Это в значительной степени связано с различными значениями величины удельного сопротивления по сечению дендритной ленты [31] (рис. 28).

Линейность температурной характеристики (рис. 29) дендритных тензоэлементов способствует их использованию в качестве датчиков температуры [58]. На рис. 30 и 31 показана амплитудная и температурная характеристики одного из миниатюрных датчиков давления диаметром 3,7 мм, длиной 10 мм с чувствительным элементом из дендритной ленты германия, включенным по схеме прямой компенсации [59].

В результате исследований представляется возможным сделать следующий вывод. Миниатюрные чувствительные элементы, состоящие из склеенных эпоксидным клеем Д-86 германиевых дендритных лент или пластин из монокристалла кремния, при рабочем диапазоне относительных деформаций $\pm 0,0004$, относительном температурном коэффициенте сопротивления 0,003—0,005 и прямой компенсации по выходному сигналу в интервале температур от -20 до $+50^\circ\text{C}$ имеют следующую температурную погрешность в % на 1°C : кремниевые тензоэлементы 0,1—0,2, германиевые тензоэлементы 0,2—0,4.

Характеристики кварцевого тензорезисторного чувствительного элемента. В настоящее время кремниевые тензорезисторы соединяют с упругими элементами датчиков при помощи клея. Коэффициент тензочувствительности приклеенных ПТ меньше, чем у ПТ в свободном состоянии за счет влияния переходного слоя клея и

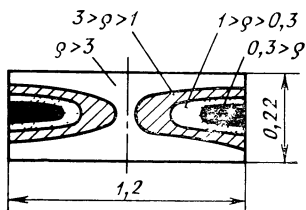


Рис. 28. Распределение удельного сопротивления в поперечном сечении дендритной ленты германия с примесью мышьяка

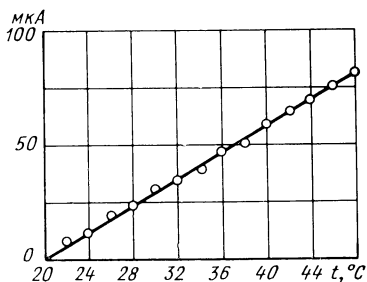


Рис. 29. Температурная характеристика чувствительного элемента из дендрита германия p -типа; $\rho = 0,900 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $R_0 = 2700 \text{ Ом}$

подложки. Кроме того, соединению ПТ с упругим элементом при помощи клея присущ общий принципиальный недостаток — ползучесть и нестабильность приклеенного тензорезистора при изменении нагрузки, температуры, влажности окружающего воздуха и атмосферного давления. Этот недостаток является следствием физико-химических свойств (ползучесть, значительный гистерезис

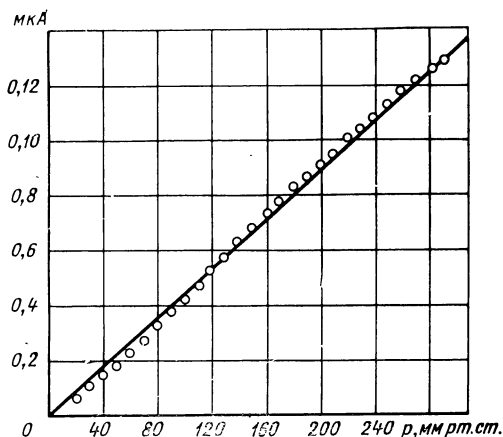


Рис. 30. Статическая характеристика миниатюрного датчика давления

и последствие, большие величины температурного коэффициента расширения и продольного модуля упругости, набухание, старение и т. д.) клеевых швов [42, 43]. Известно, что ползучесть у ПТ, наклеенных клеями типа БФ-2, ВЛ-931, Д-86 и др., не может быть доведена до величины менее 1,5—2%.

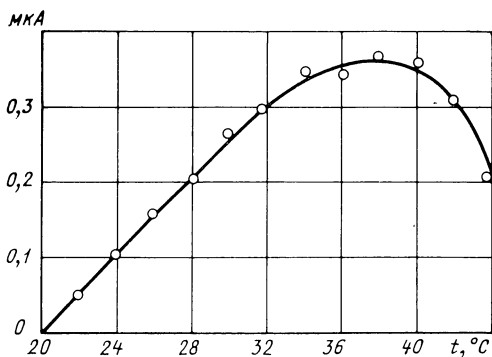


Рис. 31. Температурная характеристика миниатюрного датчика давления

Таким образом, разрабатывать конструкции измерительных устройств, вообще, с наклеенными ПТ с основной приведенной погрешностью менее 2—3%, как правило, не представляется возможным.

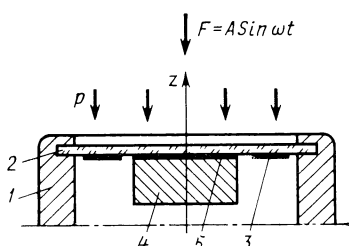


Рис. 32. Двухканальный чувствительный элемент:

1 — корпус датчика; 2 — кварцевая мембрана; 3 — вплавленные тензорезисторы; 4 — инерционный элемент из тантала; 5 — галлиевый сплав; z — измерительная ось

Разработанный в ОКБ БИМК ЛЭТИ новый способ соединения упругого элемента датчика из кварца или кремния (мембрана, балка, нить) с кремниевым ПТ, например, на основе нитевидных кристаллов кремния с платиновыми токоподводами разработки Львовского политехнического института [84] спеканием (вплавлением) на низкотемпературных стекловидных эмалях, например свинцовистая эмаль с $t_{\text{плавл}} \approx 320^\circ\text{C}$, стекло № 320 ГОСНИИ стекла с $t_{\text{плавл}} \approx 400^\circ\text{C}$, не имеет указанных недостатков.

Близость химических и физических свойств кварца, кремния и эмали позволяет образовывать неразъемное соединение (спай) с высокими упругими свойствами, отличающееся стабильностью. На рис. 32 показан кварцевый упругий элемент (плоская мембрана диаметром 12 мм, толщиной 0,3 мм) с вплавленным ПТ.

При использовании кварцевой мембраны, вырезанной по срезу Кюри, в сочетании с наклеенным в центре инерционным элементом

из тантала галлиевым мекладином [61], а также вплавленными по периферии ПТ создается двухканальный чувствительный элемент для измерения давлений и продольных вибрационных ускорений. При массе инерционного элемента, равной 3 г, и суммарной емкости пьезоэлемента и кабеля 5 пкФ чувствительность канала для измерения продольных ускорений составляет 0,4—0,6 мВ/г.

При разработках датчиков для измерения давления с использованием рассмотренного способа соединения упругого элемента из кварца с ПТ основная приведенная погрешность датчиков может быть доведена до 0,1—0,5% при высокой их стабильности работы во времени.

Технология соединения кремниевых тензорезисторов с кварцевым или кремниевым упругим элементом спекания на эмали включает следующие операции.

I. Подготовка упругих элементов и тензорезисторов:

1. Обработать упругие элементы в чистой концентрированной азотной кислоте, затем промыть в дистиллированной воде и просушить.

2. Нанести на место соединения стеклянной палочкой слой взвеси из эмали, размешанной в дистиллированной воде, толщиной 0,05—0,1 мм и шириной 0,5—1 мм. Затем просушить упругий элемент на воздухе в течение не менее 2 ч.

3. Поместить упругий элемент на фарфоровую пластинку в муфельной печи. Нагреть упругий элемент до температуры, на 20—30°C превышающей температуру плавления эмали. Скорость нагрева не более 5°C в минуту. Выдержка при рабочей температуре 10 мин, затем охлаждение вместе с печью. Использовать эмали с температурой плавления выше 450°C не допускается.

II. Подготовка тензорезисторов:

1. Промыть тензорезисторы в спирте ректификате и просушить.

2. Просмотреть тензорезисторы под микроскопом с увеличением не ниже 80X. Трещины, сколы и отслоение в месте сварки платинового токоподвода с тензорезистором не допускаются.

III. Спекание:

1. Поместить тензорезистор на слой плавления эмали чувствительного элемента в предусмотренном конструкцией месте и покрыть в средней части отрезком фарфоровой палочки прямоугольного сечения (1,5×2×6).

2. Поместить упругий элемент с тензорезистором (или несколькими тензорезисторами) на фарфоровую пластинку в муфельной печи. Произвести нагрев до температуры, на 30—50°C превышающей температуру плавления эмали. Скорость нагрева не более 5°C в минуту. Выдержка при рабочей температуре 10 мин, затем охлаждение вместе с печью.

Окончательная температурная стабилизация (для снятия температурных напряжений) производится медленным нагревом (скорость нагрева не более 2°C в минуту) до температуры 150°C с выдержкой в течение 8 ч и медленным охлаждением вместе с печью.

Характеристики миниатюрных гетероэпитаксиальных тензометрических чувствительных элементов. Наиболее совершенными в настоящее время являются полупроводниковые тензометрические

чувствительные элементы, созданные на основе гетероэпитаксиальной технологии [49, 35].

Миниатюрные датчики давления крови [49] с использованием мембранных сапфировых гетероэпитаксиальных чувствительных элементов были созданы впервые в нашей стране ОКБ БИМК

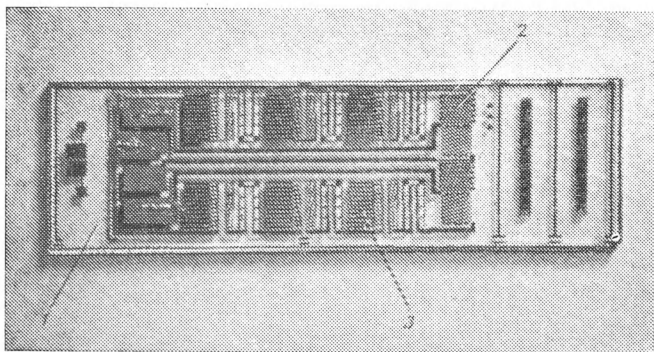


Рис. 33. Гетероэпитаксиальный чувствительный элемент:

1 — балка из сапфира; 2 — тензорезисторы (полный мост); 3 — ячейки для балансировки величин сопротивлений тензорезисторов. Толщина балки 0,2 мм, ширина 3 мм, длина 10 мм. Сопротивление тензорезисторов 10 кОм

ЛЭТИ и кафедрой БИМК СЗПИ совместно с Институтом машиноведения АН СССР (Москва).

В разработанных миниатюрных гетероэпитаксиальных чувствительных элементах решетки кремниевых тензорезисторов образовывались на сапфировых мембранах методом пиролиза моносилана.

Токоподводы (золотая проволока диаметром 0,03) соединяли с тензорезисторами методом термокомпрессии.

На рис. 33 показана микрофотография гетероэпитаксиального чувствительного элемента.

3. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Основные характеристики гальваномагнитных чувствительных элементов (датчиков Холла). Сущность эффекта Холла состоит в том, что при прохождении тока через пластину в продольном направлении под влиянием магнитного поля возникает на краях пластинки в поперечном направлении разность потенциалов, подчиняющихся закону Лоренца (под влиянием магнитного поля токоносители смещаются к краю пластины). Эта разность потенциалов (ЭДС) пропорциональна величине векторного произведения напряженности поля и тока $H \times I$. Это, во-первых, означает, что прибор, основанный на использовании эффекта Холла, представляет собой умножитель. В связи с этим датчики Холла можно использовать, например, в вольтметрах. При неизменяющемся токе ЭДС Холла прямо пропорциональна напряженности магнитного

поля, поэтому датчики Холла нашли широкое применение для измерений магнитных полей, а также перемещений (линейных и угловых) однако в последнем случае их применение пока еще ограничено.

Эффект Холла иллюстрируется на рис. 34. Рассмотрим параллелепипед из проводника или полупроводника, через который идет

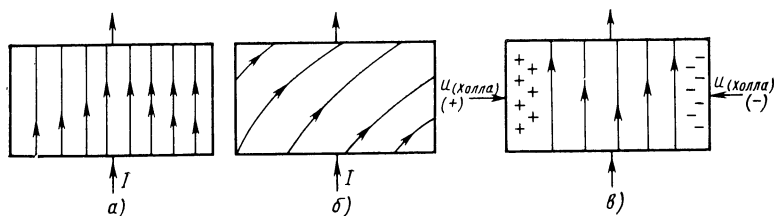


Рис. 34. К иллюстрации эффекта Холла:

a — поток электронов без магнитного поля; $б$ — поток электронов в магнитном поле искривляется; $в$ — реальные условия протекания тока в магнитном поле; в случаях $б$ и $в$ магнитное поле направлено из плоскости рисунка

ток. При отсутствии магнитного поля поток электронов не искажается, как это показано на верхней схеме. Если материал однороден, то поток электронов имеет одинаковую плотность. При наличии магнитного поля силы Лоренца отклоняют электроны и исправляют их траектории (средняя схема). Это направление траекторий приводит к появлению отрицательных зарядов на правой стороне пластины. Такое накопление зарядов продолжается, пока возникающая поперечная ЭДС не компенсирует силы, создаваемые магнитным полем. В опытах Холла пластина была металлическая, и возникающая разность потенциалов (ЭДС Холла) была чрезвычайно мала. Для увеличения ЭДС Холла необходима малая концентрация носителей в пластине при высокой их скорости — этим условиям удовлетворяют полупроводниковые материалы. В настоящее время датчики Холла изготовляют исключительно из полупроводниковых материалов. Их высокое удельное сопротивление позволяет получить ЭДС Холла порядка милливольт или даже вольт. Проводники позволяют получить ЭДС Холла величиной не более нескольких нановольт.

Датчики Холла (рис. 35) чаще всего изготовляют из следующих полупроводниковых материалов: германия, антимонида, арсенофосфида или арсенида индия (Ge, InSb, PAs, InAs).

ЭДС Холла описывается уравнением

$$E_2 = \frac{R_X}{h} I_1 B, \quad (68)$$

где E_2 — ЭДС Холла, мВ; R_X — постоянная Холла, зависящая от типа полупроводникового материала; I_1 — управляющий ток, мА; B — индукция магнитного поля, Тл; h — толщина пластины, мм.

Наиболее распространенной формой датчика Холла является плоская пластина (рис. 35) с двумя парами электродов. Через

одну из них (1—1') протекает ток I_1 , с другой (2—2') снимается ЭДС Холла.

Датчики Холла нашли широкое применение в технике (измерение магнитных полей, бесколлекторные двигатели, сельсины, датчики перемещений и т. д. [32, 75, 105, 106]).

Основные преимущества датчиков Холла следующие: 1) малые габаритные размеры и толщина; 2) высокая точность измерений

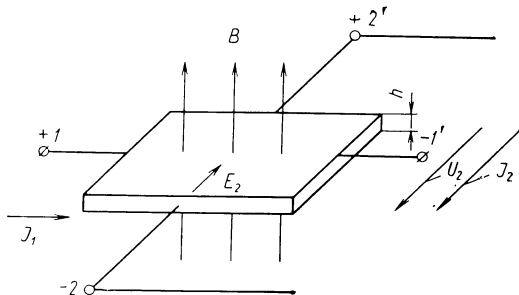


Рис. 35. Схема датчика Холла

(линейная зависимость ЭДС Холла от величины индукции); 3) широкий диапазон измерений; 4) неограниченный диапазон частот; 5) широкий температурный диапазон.

Главным недостатком датчиков Холла является малый КПД.

Основным параметром датчика Холла является его чувствительность, которая выражается отношением ЭДС Холла к напряженности магнитного поля:

$$S = \frac{E_2}{H}. \quad (69)$$

Обычно чувствительность определяется при двух противоположных направлениях тока через датчик и рассчитывается по формуле

$$S = \frac{U_1 + U_2}{2HI} 10^{-3} [\text{мкВ А}^{-1} \text{Э}^{-1}], \quad (70)$$

где U_1 и U_2 — выходные напряжения датчика при двух противоположных направлениях тока; H — напряженность внешнего магнитного поля, Э; I — ток, протекающий через датчик, А.

Если сравнить два датчика Холла по чувствительности, то лучшим будет тот, у которого она получена по меньшим мощностям.

Введем понятие относительной чувствительности по напряжению:

$$S' = \frac{S}{U_{\text{вх}}}. \quad (71)$$

Иногда вместо чувствительности оперируют понятием коэффициента передачи по напряжению

$$K = \frac{U_x}{U_{вх}}. \quad (72)$$

Входное сопротивление датчика Холла — это сопротивление, измеренное между контактами 1—1' (рис. 35). Выходное сопротивление — это сопротивление, измеренное между контактами 2—2'.

Температурный коэффициент ЭДС Холла вычисляют по зависимости

$$\beta_x = \frac{U_t - U_{20}}{U_{20} (t - 20)} 100\% / ^\circ\text{C}, \quad (73)$$

где β — температурный коэффициент ЭДС Холла; U_t — выходное напряжение при заданном значении температуры; U_{20} — выходное напряжение при температуре 20°C ; t — заданная температура, $^\circ\text{C}$.

При проектировании датчиков с чувствительными элементами Холла необходимо знать еще один параметр — напряжение неэквивпотенциальности.

Напряжение неэквивпотенциальности — паразитное напряжение, которое возникает из-за расположения электродов 2—2' не на одной эквивпотенциальной линии при изготовлении датчиков Холла.

Введем понятие коэффициента неэквивпотенциальности

$$K_{нэ} = \frac{U_{нэ}}{I} [\text{BA}^{-1}], \quad (74)$$

где $K_{нэ}$ — коэффициент неэквивпотенциальности; $U_{нэ}$ — напряжение неэквивпотенциальности между электродами 2—2' (Холловскими электродами), измеренное при отсутствии внешнего магнитного поля; I — номинальный управляющий ток

При расчете чувствительности датчиков Холла, кроме ЭДС неэквивпотенциальности, необходимо также учитывать другие паразитные ЭДС, например ЭДС магниторезистивного эффекта, ЭДС поперечного гальваноманитного эффекта, ЭДС термогальваноманитного эффекта и т. д. При малых значениях E_2 снижение чувствительности датчиков Холла за счет упомянутых ЭДС может быть значительным (см. также журнал «Приборы и системы управления», 1977, № 1, стр. 44).

Основные характеристики распространенных отечественных датчиков (преобразователей) Холла приведены в табл. 7.

Для построения малогабаритных, но не миниатюрных датчиков давления могут быть использованы в основном две конструктивные схемы магнитных систем с датчиками Холла.

В постоянном магнитном поле (рис. 36) помещены два одинаковых датчика Холла, ширина которых равна ширине полюсов.

Электрически датчики Холла связаны между собой таким образом, что питающие их токи равны по величине и направлены в противоположные стороны. ЭДС Холла будут при этом направлены встречно. Таким образом, при последовательном соединении датчиков выходной сигнал системы равен разности сигналов датчиков Холла:

$$U_{вых} = U_{X_1} - U_{X_2}. \quad (75)$$

Таблица 7

Параметры преобразователей Холла, выпускаемых отечественной промышленностью

Тип	Номинальный ток I_H , мА	Диапазон полей B , Т	Чувствительность S_B при номинальном то- ке, В/Т	Сопротивление, Ом		Независимость вы- ходного сигнала от температуры, °С	Температурный коэффи- циент, %/°С			Диапазон температур, °С	Размер активной пластины, мм
				входное R_T	выходное R_X		сопротивления	ЭДС Холла R_H			
									входного		
X111	10	3-5	0,045-0,2	30-180	40-200	2-2,5	0,5	0,3-0,5	0,5	От -40 до +80	1,5×0,8× ×0,2
X112	20	3-5	0,12-0,3	30-180	55-200	2-2,5	0,5	0,3-0,5	0,5	» -40 » +80	4×2×0,2
X114	50	3-5	0,32-0,42	18-30	25-30	3	0,5	0,3-0,5	0,5	» -40 » +80	9×4×0,3
X210	100	10	0,06-0,12	0,5-5	0,8-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +80	0,85×0,55× ×0,2
X211	100	10	0,06-0,15	0,5-5	0,8-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +90	1,5×0,8×0,2
X212	150	15	0,09-0,27	0,5-5	0,5-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +100	4×2×0,2
X213	160	18	0,096-0,32	0,5-5	0,5-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +110	5×3×0,2
X214	200	20	0,12-0,46	0,5-9	0,5-9	1,2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +120	8×4×0,2
X221	120	10	0,07-0,18	0,5-5	0,5-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +80	1,5×1×0,2
X222	180	15	0,10-0,32	0,5-5	0,5-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +100	4×2×0,2
X223	190	18	0,11-0,38	0,5-5	0,5-5	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +110	5×3×0,2
X224	210	20	0,12-0,48	0,5-9	0,5-9	2	0,2	0,15	0,3	» -60 » +120	8×4×0,2
X510	90	10	0,03-0,20	1-6	1,3-6	1,5	0,04	0,09	0,07	» -100 » +160	0,85×0,55× ×0,2
X511	100	14	0,04-0,32	1-6	1,5-6	1,0	0,04	0,09	0,07	» -100 » +180	1,5×1×0,15
ДХП-2	13-15	—	0,45	220-320	220-320	—	0,4	0,2	0,4	» -60 » +70	6×3×0,15
ДХП-2А	13-15	—	0,45	200-320	200-320	—	0,4	0,2	0,4	» -60 » +70	6×3×0,15
ДХП-2С	20-23	—	0,8	220-350	220-350	—	0,4	0,2	0,4	» -60 » +70	12×6×0,16
ДХП-2И	6-8	—	0,2	200-350	200-350	—	0,4	0,2	0,4	» -60 » +70	2,6×1,6× ×0,15
ДХП-0,5	25-30	—	0,25	40-90	40-90	—	0,6	0,02	0,6	» 0 » +70	6×3×0,15
ДХП-0,5С	45-60	—	0,45	40-110	40-110	—	0,6	0,02	0,6	» 0 » +70	6×3×0,15
ДХП-0,5М	10-12	—	0,12	40-120	40-120	—	0,6	0,02	0,6	» 0 » +70	6×3×0,15
ДХК-7	13-15	—	0,5	500-1000	500-1000	—	1,3	0,08	1,3	—	6×3×0,15
ДХК-7М	8-10	—	0,3	500-1000	500-1000	—	1,3	0,08	1,3	—	6×3×0,15
ДХК-14	6-9	—	0,6	500-1000	500-1000	—	1,3	0,08	1,3	—	6×3×0,15

Каждое из значений U_{X_1} и U_{X_2} пропорционально линейному перемещению датчика Холла в магнитном поле. Для двух жестко связанных между собой датчиков всегда можно найти положение, при котором холловские напряжения равны по величине, а их разность равна нулю. Конструктивно датчик линейных или угло-

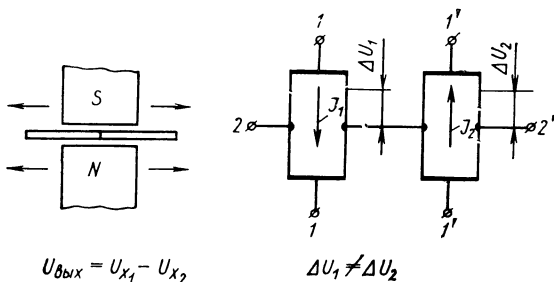


Рис. 36. Схема датчика перемещений с двумя элементами Холла

вых перемещений может быть выполнен так, что датчик Холла соединяют с неподвижной частью системы, а постоянные магниты — с подвижной. Угловые перемещения магнитов на малых углах можно считать пропорциональными линейными перемещениями в направлениях, указанных стрелками на рисунке. Датчики перемещений, выполненные по этой схеме, имеют ряд недостатков.

Цепи управления датчиков Холла должны быть гальванически не связаны между собой, т. е. датчики должны питаться от отдельных трансформаторов, так как даже при $U_{\text{на}} = 0$ для каждого датчика в отдельности на выходе может появиться значительный паразитный сигнал, обусловленный неодинаковыми значениями падений напряжения ΔU_1 и ΔU_2 .

Напряжения неэквипотенциальности, когда они существуют, могут суммироваться на выходе и тем самым уменьшить точность работы датчика перемещения.

В постоянном знакопеременном магнитном поле (рис. 37) помещен один датчик Холла. В положении, когда пластина датчика пересекает одинаковые по величине и разные по направлению магнитные потоки, напряжение на выходе датчика перемещений равно нулю. При отклонении магнитов влево или вправо на выходе возникает электрический сигнал, пропорциональный перемещению магнитов и меняющий знак при переходе через нуль.

Конструктивная схема (рис. 38) имеет существенные преимущества перед первой (см. рис. 36), так как здесь исключается необходимость питания датчиков Холла от разных источников тока и отпадает необходимость в их строгом подборе. Однако в этой схеме несколько увеличиваются габаритные размеры магнитной системы.

Объем и масса постоянных магнитов должны быть минимальными при максимальной индукции в рабочем зазоре датчика. Эти

требования могут быть выполнены при изготовлении магнитов из специальных материалов (например, из сплава ПЛК-78).

Магниты из платино-кобальтового сплава ПЛК-78, подвергнутые соответствующей термической обработке, имеют следующие свойства: остаточная индукция $B=0,6$ Т; коэрцитивная сила $H_c=3 \cdot 10^5$ А/м; магнитная энергия $(BH)_{\max}=7 \cdot 10^4$ ТА/м.

В последние годы разработаны постоянные магниты из ин-терметаллических соединений с высокими магнитными свойствами

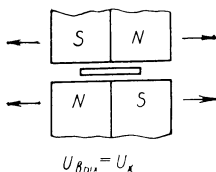


Рис. 37. Схема датчика перемещений с одним элементом Холла, расположенным в постоянном знакопеременном магнитном поле

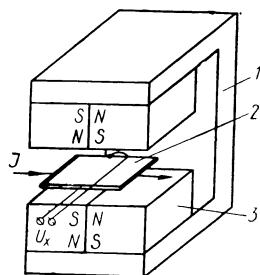


Рис. 38. Конструктивная схема датчика перемещений:
1 — магнитопровод; 2 — датчик Холла; 3 — постоянные магниты

[78], например типа RCO_5 , где R — редкоземельный элемент. Соединение $SmCO_5$ имеет следующие характеристики: $B=0,9$ Т, $H_c=7 \cdot 10^5$ А/м; $(BH)_{\max}=15 \cdot 10^4$ ТА/м. Магниты из этих соединений могут иметь пластинчатую форму с минимальным размером, что позволяет применить более совершенную конструктивную схему преобразователей перемещений, в которой магнитная система подвижна, а датчик Холла неподвижен.

Основную погрешность в работу датчика вносит температурная зависимость параметров преобразователя Холла. Датчик Холла почти всегда имеет некоторую величину напряжения неэквипотенциальности, которая при установке нуля датчика компенсируется выходным сигналом той же величины, что и U_{H3} , но противоположного значения $U_{H3}=U_{ВХ}$.

Если датчик однороден и электрическое сопротивление токоподводов мало, то при $U_{ВХ}=\text{const}$ напряжение неэквипотенциальности не будет зависеть от температуры. Дрейф нуля датчика при этом определится только температурной зависимостью чувствительности.

В положении системы, принятом за нуль, при температуре, отличной от температуры регулировки, имеем

$$U_X \neq U_{H3}; \quad U_{H3} - U_X = \Delta U;$$

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta U}{S}, \quad (76)$$

где $\Delta \varphi$ — дрейф нуля датчика; S — чувствительность датчика.

Схемы компенсации изменения чувствительности преобразователей Холла с температурой

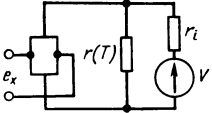
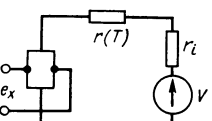
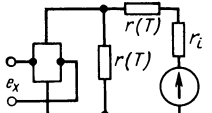
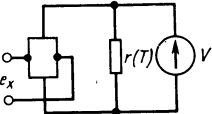
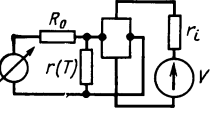
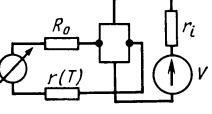
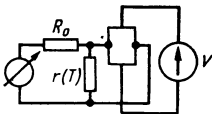
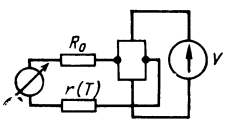
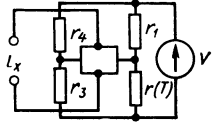
Схема	Закон изменения сопротивления термистора с температурой
	$r(T) = \frac{1}{\left[\frac{R_X(T)}{r_T(T)} \frac{1}{S_X d} - 1 \right] \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_T(T)}}$
	$r(T) = r_T(t) \left[\frac{R_X(T)}{r_T(T) S_V d} - 1 \right] - r_i$
	$r_1(T) = \frac{1}{\left[\frac{R_X(T)}{r_T(T) S_V d} - 1 \right] \frac{1}{r_i + r(T)} - \frac{1}{r_T(T)}}$
	$r(T) = \frac{r_T(T)}{R_X(T) \frac{1}{S_T d} - 1}$
	$r(T) = \frac{R_0 r_X(T) [r_T(T) + r_i]}{R_0 R_X(T) \frac{C}{S_V d} - [r_T(T) + r_i] [r_X(T) + R_0]} \rightarrow$
	$r(T) = \frac{R_0 R_X(T) \frac{C}{S_V d} - [r_i + r_T(T)] [r_X(T) + R_0]}{r_i + r_T(T)} \rightarrow$

Схема	Закон изменения сопротивления термистора с температурой
	$r(T) = \frac{r_X(T)}{\frac{C}{S_V d} \frac{R_X(T)}{r_T(T)} - \frac{r_X(T)}{Q_0} - 1}$
	$r(T) = \frac{R_0}{r_T(T)} \left[R_X(T) \frac{C}{S_V d} - 1 \right] - r_X(T)$
	$r(T) = \frac{\frac{R_X(T)}{r_T(T)} \frac{r_1 r_2}{S_1 d} - (r_1 + r_3 + r_4)}{\frac{R_X(T)}{r_T(T)} \frac{r_4}{S_T d} + 1}$

Важным фактором, влияющим на точность работы, является температурная зависимость входного и выходного сопротивлений, нарушающая условия согласования сопротивлений в схеме.

По рассмотренной схеме со знакопеременным магнитным полем и четырьмя постоянными магнитами разработаны малогабаритные датчики давления крови и параметров дыхания.

Для миниатюрных датчиков с элементами Холла применимы магнитные схемы с полями рассеивания, эти схемы рассмотрены в п. 2 гл. V.

Схемы температурной компенсации. В настоящее время отечественная промышленность выпускает датчики Холла с высокими метрологическими характеристиками и малыми значениями температурных коэффициентов, например малогабаритные датчики Холла типов X510 и X511 (см. табл. 7).

Эти чувствительные элементы Холла позволяют разрабатывать датчики с температурной погрешностью 2—3% в интервале температур 15—40°C без использования специальных схем компенсации или термостатирования.

При более жестких требованиях к точности измерений и более широком температурном диапазоне необходимо применять схемы компенсации чувствительности преобразователей Холла с температурой. Обычно в этих схемах используется термистор, располагаемый непосредственно у датчика Холла. Вопросы термокомпенсации рассмотрены в работах [32, 75]. В табл. 8 обобщены основные схемы компенсации и даны необходимые законы изменения сопротивления термистора с температурой.

4. ПЬЕЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Прямой пьезоэффект заключается в том, что некоторые вещества с кристаллической структурой под действием механических сил могут электрически поляризоваться.

Пьезоэффект выражен наиболее сильно у кварца, турмалина и у сегнетоэлектриков — сегнетовой соли, титаната бария, цирконата, титаната свинца и др. Кварц обладает наибольшим постоянством пьезоэффекта из всех известных кристаллических тел. Он также почти не растворим в воде и физиологических жидкостях. Температурная чувствительность кварцевых пьезоэлементов не превышает нескольких процентов при повышении температуры до 300°C. Недостаток кварцевых пьезоэлементов — низкая чувствительность. Однако использование в датчики нескольких пьезоэлементов из кварца в виде круглых пластин с отверстиями позволило получить центрированные преобразователи с чувствительностью, достаточной для измерения малых величин перегрузок до 0,05 g. Эти малогабаритные датчики параметров вибрации типа ПКД рассмотрены в работах [62, 63, 64]. Стабильность характеристик, малая величина (до 1%) паразитной поперечной чувствительности, а также высокие частотные свойства датчиков параметров вибрации в значительной степени определяются свойствами пьезоэлементов, которые в свою очередь зависят от технологии их изготовления.

Ниже дана разработанная технология сверления отверстий в кварцевых пластинах (X-среза), применяемых для датчиков параметров вибрации с высокими метрологическими характеристиками.

1. Для сверления отверстий в кварцевых пластинах X-среза (диаметр 10 мм; толщина 0,5 мм) может быть использован любой часовой настольный сверлильный станок со скоростью вращения шпинделя 400—500 об/мин. Подача сверла должна осуществляться вручную с усилием, не превышающим ~ 4 Н.

2. Для сверления отверстий и шлифовки фасок используется комплект инструмента, показанный на рис. 39.

3. В качестве абразивного материала используется наждачный порошок зернистостью 320 и 7 мкм.

4. Для склеивания пластин при сверлении используют специальную замазку (замазка Кренгеля), состоящую из двух частей канифоли и одной части пчелиного воска (по весу).

Порядок сверления отверстий

5. Латунную оправку помещают на стеклянную пластину. Кварцевые пластины (6 шт.) размещают в отверстие оправки. Собранный таким образом пакет нагревают на керамической подставке до температуры $90 \pm 10^\circ\text{C}$, затем в отверстие оправки кладут 0,2 г замазки Кренгеля.

После расплавления замазки латунную втулку устанавливают на место в оправку и сверху прижимают грузом силой тяжести 1 Н.

После остывания груз снимают, а отверстие во втулке протирают ватным тампоном для удаления излишков замазки.

6. Наждак (зерно 320, ГОСТ 3647—59) замешивают с водой до получения сметанообразной массы.

7. Собранный пакет (см. пункт 5) помещают на столик сверлильного станка. Наждачную массу переносят стеклянной лопаткой в отверстие втулки до полного его заполнения, после чего

приступают к сверлению отверстий с использованием латунного сверла (трубка с прорезью), изображенного на рис. 39.

8. После высверливания отверстий пакет промывают водой и отверстия во втулке и шайбах протирают ватным тампоном для удаления следов абразива.

9. Наждак зернистостью 7 мк (ГОСТ 3647—71) замешивают водой до получения сметанообразной массы. Отверстия в шайбах, в пакете шлифуют сверлом с последующей проверкой размера 3,5 Н8 или 4 Н8 соответственно.

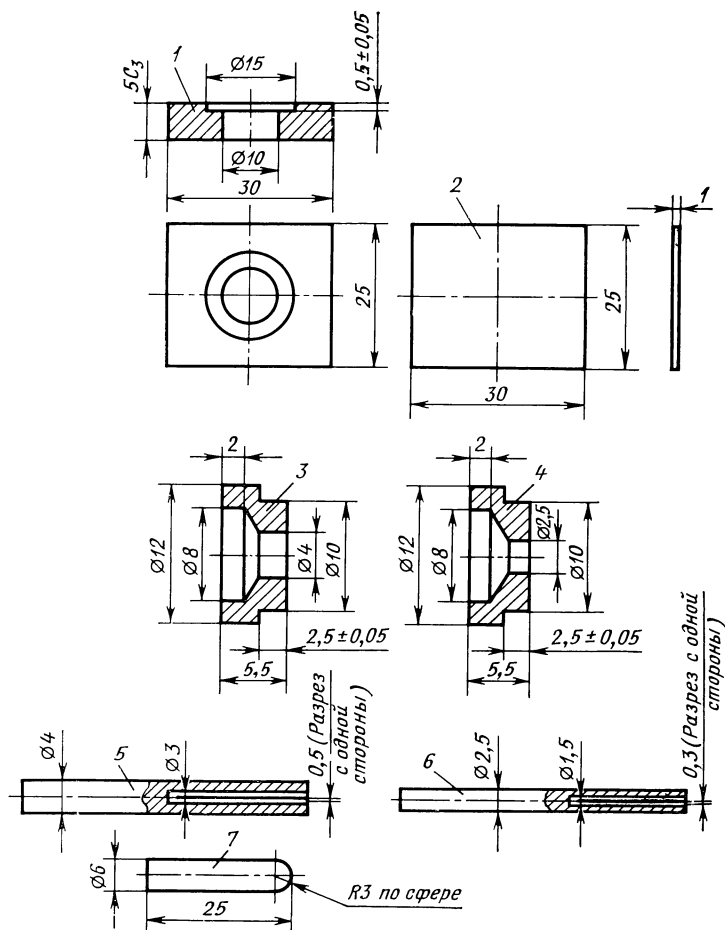


Рис. 39. Приспособления и инструмент для сверления отверстий в кварцевых пластинах:

1 — оправка; 2 — стеклянная пластина; 3 — втулка; 4 — втулка; 5 и 6 — сверла; 7 — грибок

Таблица 9

Основные характеристики кварца и цирконатов-титанатов свинца

Параметр	Кварц	Цирконаты-титанаты свинца		
		ЦТС-19	ЦТС-21	ЦТС-22
Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^3$	2,65	7,0	7,0	7,0
Относительная диэлектрическая постоянная	4,5	1500^{+300}_{-350}	$550 \pm \pm 150$	$800 \pm \pm 200$
Пьезомодуль, $\text{Кл/Н} \cdot 10^{12}$	2,2	100—200	25—65	50—100
Модуль Юнга E , $\text{Н/м}^2 \cdot 10^{-10}$	7,75	5,5—8,5	8,5—9,5	8,5—10
Скорость звука, м/с	5720	3000—3600	3500—3800	3600—4000
Акустическое сопротивление, $\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^{-4}$	152	210—250	245—265	250—280
Температура структурного превращения, $^{\circ}\text{C}$	576	290	$410 \pm \pm 10$	$330 \pm \pm 10$
Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	500	—	—	—
Коэффициент линейного расширения, 10^{-6}	14	—	—	—
Прочность, $\text{Па} \cdot 10^7$:				
на сжатие	35	3	3	3
на растяжение	1000	—	—	—
на изгиб	1270	—	—	—
Коэффициент электромеханической связи k_p	0,1	0,40	0,20	0,20
Удельное объемное электрическое сопротивление при 100°C , $\text{Ом} \cdot \text{см}$	—	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$

10. Пакет промывают водой и вытирают салфеткой насухо.

11. Пакет нагревают до 90°C и разбирают.

12. Шайбы протирают и промывают в бензине.

13. В патрон станка вставляют грибок (см. рис. 39) и сферическую часть его смазывают смесью (см. пункт 10). Сферической частью грибка шлифуют фаски в отверстиях шайб с двух сторон.

14. Шайбу промывают в воде и высушивают.

15. Просматривают шайбы под микроскопом с увеличением $80\times$. Трещины и сколы не допускаются.

16. Шайбы обрабатывают в 100%-ном растворе щелочи (ГОСТ 9285—69) и затем промывают в дистиллированной воде, после чего шайбы обрабатывают в чистой азотной кислоте ГОСТ 4461—67 и вновь промывают в дистиллированной воде.

Хранить шайбы необходимо в стеклянной бьюксе с бензином «калоша».

Шайбы допускается брать только пинцетом из оргстекла за боковые поверхности.

Выпуск промышленностью пьезокерамических материалов с высокими значениями физико-механических и акустических пара-

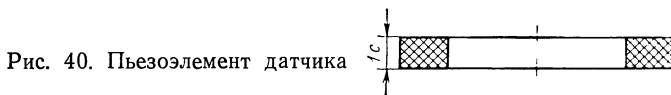


Рис. 40. Пьезоэлемент датчика

метров [26, 37] открыл новые возможности при конструировании высокочувствительных малогабаритных датчиков для измерения параметров вибрации. Лучшими пьезоэлементами в настоящее время являются твердые растворы на основе цирконата свинца, содержащие более 10% титаната свинца. Эти твердые растворы, сокращенно называемые ЦТС, имеют точку Кюри от 220 до 490°C, в зависимости от процента содержания компонентов.

Пьезокерамические чувствительные элементы, выполненные из материалов ЦТС, имеют после обжига характерный светло-желтый или светло-бежевый цвет, в зависимости от введенных добавок, и хорошо поддаются шлифованию. Материалы типа ЦТС характеризуются высокими значениями пьезомодулей и вместе с тем имеют хорошую температурную и временную стабильность. Основные характеристики кварца и цирконатов—титанатов свинца даны в табл. 9.

Наряду с пьезоэлементами в виде шайб, испытывающих сжатие—растяжение, для конструирования датчиков параметров вибрации целесообразно использовать биморфные пьезоэлементы, работающие на изгиб. Эти элементы состоят из двух одинаковых склеенных между собой балок или пластин, между которыми находится металлическая прокладка. При изгибе такого элемента одна балка удлиняется, а другая укорачивается. При соответствующей поляризации можно получить либо сумму напряжений (последовательная схема), либо сумму зарядов (параллельная схема). Преимуществом чувствительных элементов, работающих на изгиб, является значительно большая чувствительность по сравнению с работающими на сжатие. Однако изгибные элементы значительно уступают последним по прочности,

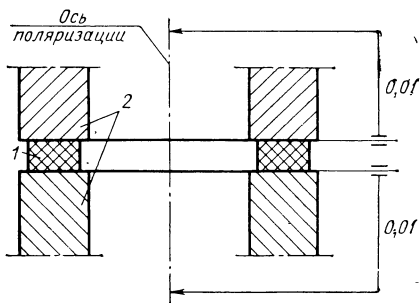


Рис. 41. К поляризации пьезоэлементов:

1 — пьезоэлемент; 2 — электроды-зажимы

элементов, работающих на изгиб, является значительно большая чувствительность по сравнению с работающими на сжатие. Однако изгибные элементы значительно уступают последним по прочности,

диапазону рабочих частот, а также по величине паразитной поперечной чувствительности.

На рис. 40 показан кольцевой пьезоэлемент центрированных датчиков, изготовленный из ЦТС-19. На торцевых поверхностях пьезоэлемента имеют электроды, выполненные методом «вжигания» серебра.

Для снижения поперечной чувствительности датчика допуск на отклонение оси чувствительности от его геометрической оси должен быть жестким, так как ошибка в рассогласовании осей в одну угловую минуту вызывает появление поперечной чувствительности не менее 0,03%. В связи с этим при конструировании основы для поляризации пьезоэлементов прецизионных датчиков необходимо задавать жесткие допуски на перпендикулярность осей электродов-зажимов к плоскостям поляризации пьезоэлементов. На рис. 41 показана принципиальная схема технологического зажима для поляризации кольцевых пьезоэлементов с указанием необходимого допуска (0,01) на перпендикулярность осей электродов к торцевым поверхностям пьезоэлемента.

5. ЕМКОСТНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Общие свойства. Емкостные чувствительные элементы (преобразователи) датчиков физических величин в большинстве случаев представляют собой плоские конденсаторы. Эти датчики позволяют измерять перемещения рабочей точки упругого элемента (например, центра мембраны), исчисляемые сотыми и тысячными долями микрометра.

Емкость плоского конденсатора определяется зависимостью

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta}, \quad \Phi, \quad (77)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды между пластинами (для воздуха $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); S — площадь поверхности пластины, м²; δ — зазор между пластинами, м.

Зависимость емкости от изменения величины зазора нелинейна, однако при малых относительных перемещениях подвижной пластины эта зависимость может считаться приближенно линейной. При перемещении пластины на величину x имеем зависимость

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta - x} = \frac{ES}{\delta \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)} = \frac{\epsilon S \left(1 + \frac{x}{\delta}\right)}{\delta \left[1 - \left(\frac{x}{\delta}\right)^2\right]}.$$

Пренебрегая величиной $\left(\frac{x}{\delta}\right)^2$, получим

$$C \approx C_0 + C_0 \frac{x}{\delta}. \quad (78)$$

В прецизионных датчиках величина $\left(\frac{x}{\delta}\right)^2$ может быть доведена до значений 0,005—0,01, при этом нелинейность емкостного

преобразователя не превышает 1%, однако при этом резко снижается чувствительность датчиков. Наиболее употребительны две конструктивные схемы емкостных чувствительных элементов датчиков давления. В первом случае плоская мембрана является подвижным электродом плоского конденсатора. Во втором случае центр мембраны жестко связан с плоским электродом, который помещен с определенными зазорами между двумя неподвижными электродами. Такая конструкция позволяет включать электроды по дифференциальной схеме, что повышает чувствительность датчика в 2 раза.

Главная сложность при разработке емкостных датчиков заключается в снижении температурной погрешности, вызванной смещением электродов (пластин) конденсатора емкостного преобразователя при изменении температуры за счет неравенства значений температурных коэффициентов линейного расширения материала элементов конструкции. При разработках емкостных датчиков давления с одним неподвижным электродом (первая конструктивная схема) снизить температурную погрешность можно конструктивным путем. Обычно [101, 15] изоляционную втулку неподвижного электрода выполняют с буртиком (уступом). Наличие уступа и жесткое закрепление втулки в основном и является причиной значительной температурной погрешности емкостного преобразователя. Ниже рассматривается конструкция (рис. 42), не имеющая этого

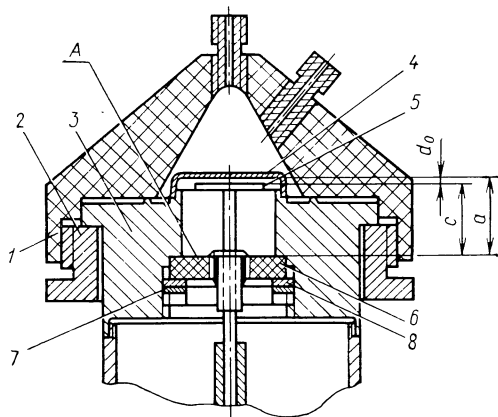


Рис. 42. Емкостный преобразователь давления:

1 — крышка; 2 — гайка; 3 — корпус; 4 — мембрана;
5 — электрод; 6 — изоляционная шайба; 7 — гайка;
8 — пружинная шайба

недостатка. Здесь для крепления неподвижного электрода применена изоляционная шайба 6 без буртика, что совмещает опорную и установочную поверхность (плоскость «А»). При такой конструкции нет необходимости производить температурную компенсацию подбором соответствующих материалов и соотношения размеров.

При изготовлении мембраны, корпуса и неподвижного электрода из одной марки материала (например, бериллиевой бронзы)

остаточная температурная погрешность, возникающая за счет наличия воздушного зазора, невелика и не превышает 0,5—1% на 10°C. Изменение величины зазора $\Delta\delta_0 = \delta_t - \delta_0 = \delta(1 + \alpha_t \Delta t) - \delta_0 = \delta_0 \alpha_t \Delta t$. Эта величина мала. Например, при $\delta_0 = 0,1$ мм, $\Delta t = 10^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,02$ (прогиб центра мембраны) и $\alpha_t = 16 \cdot 10^{-6}$ 1/°C величина $\Delta\delta_0 = 0,16 \cdot 10^{-4}$, что составляет $\sim 0,1\%$ от величины x . Конструкция отличается простотой изготовления, технологичностью, а также стабильностью характеристик при серийном изготовлении. Здесь постоянство рабочего зазора δ_0 достигается простым технологическим приемом: на дно мембраны устанавливают щуп, толщина которого равна величине зазора δ_0 . Затем устанавливают неподвижный электрод и изоляционную шайбу затягивают гайкой через упругую шайбу. На корпусе, изоляционной шайбе, пружинной шайбе и гайке наносят установочные риски. Пустота между хвостовиком электрода и диском заливают компаундом холодного отверждения, после чего электрод плотно прижимают через щуп к дну мембраны грузом. После отверждения компаунда гайку отворачивают, щуп удаляют и производят окончательную сборку с совмещением рисок, что обеспечивает первоначальное расположение деталей со строгим постоянством величины воздушного зазора. Пружинная шайба 8 предотвращает деформацию изоляционной шайбы 6 при изменениях температуры.

При разработках емкостных дифференциальных датчиков давления для снижения температурной погрешности необходимо изготавливать все детали емкостного преобразователя из металла одной марки и одной марки изолятора, причем температурные коэффициенты линейного расширения этих материалов должны быть по возможности малы и не должны отличаться по своим значениям более чем на 1—3%. Наиболее полно этим требованиям из известных материалов в настоящее время удовлетворяет металл — сплав, 55ВТЮ, изолятор — оптическое стекло марки ЛК6 (ГОСТ 3514—67) с $\alpha_t = 80 \cdot 10^{-7}$ 1/°C. В измерительной головке (см. рис. 70) датчика давления для глубоководных исследований [65] изоляторы 5 неподвижных пластин выполнены в виде цилиндрических столбиков из стекла марки ЛК6. Они спечены на стекловидной свинцовистой эмали или склеены клеем ВЛ-931 с неподвижными пластинами и корпусом. Эта конструкция обеспечивает наименьшее шунтирующее действие корпуса на неподвижные пластины, а также отличается технологичностью изготовления с обеспечением заданного зазора между пластинами с точностью 0,0050—0,01 мм при серийном изготовлении. Температурная погрешность измерительной головки данной конструкции не превышает 0,1—0,2%/°C.

Для снижения температурной погрешности до величины менее 0,1%/°C перспективна конструкция измерительной головки, выполненная из кварца, в которой неподвижные и подвижная пластины образованы напылением тонкой пленкой металла (например, суперинвара) непосредственно на кварце.

В большинстве случаев емкостной преобразователь датчика включают в активное плечо измерительного моста. Измерительная схема должна иметь большое сопротивление в выходной диагонали моста, подводящие провода должны быть экранированы. Конструктивные элементы, шунтирующие емкосты пластин, должны отсутствовать. С повышением частоты питания сопротивление $x_c = \frac{1}{\omega C}$

емкостных преобразователей снижается, и условия работы измерительной схемы улучшаются. В связи с этим частоту напряжения питания выбирать ниже 400—1000 Гц не следует.

Выходное напряжение моста рассчитывают по формуле

$$U = \frac{U_{\text{п}}}{2} \frac{\varepsilon \delta}{\sqrt{(1 - \varepsilon_{\delta}^2) \frac{1}{a^2} + 1}}, \quad (79)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания; $\varepsilon_{\delta} = \frac{\Delta \delta}{\delta}$ — относительное изменение зазора; $a = \frac{Z_{\text{пок}}}{Z_{\text{вых}}}$ — отношение входного сопротивления показывающего прибора к выходному сопротивлению моста.

Видно, что линейность характеристик емкостного дифференциального преобразователя определяется, в частности, отношением входного сопротивления показывающего прибора к выходному сопротивлению моста. Например, при $a=1$ нелинейность преобразователя достигает 10%.

Емкостные преобразователи давления имеют следующие преимущества: 1) высокую чувствительность и точность; 2) стабильность характеристики и простоту эксплуатации; 3) технологичность изготовления и взаимозаменяемость.

К недостаткам емкостных преобразователей относятся: 1) необходимость использования высокостабильных высокочастотных генераторов напряжения; 2) сложность компенсации и стабилизация емкостей проводов связи датчика с элементами измерительной схемы; 3) наличие температурной погрешности.

Линеаризация емкостного преобразователя давления [36]. При малых прогибах (0,01—0,02 мм) центра плоских мембран емкостных преобразователей давления их линейность достаточно высока (1—2%), а чувствительность мала ($C=1-3\% C_0$), что требует применения усилителей с высоким коэффициентом усиления. Малые прогибы центра мембран обеспечивают высокие частотные свойства датчиков (резонансные частоты 100 Гц и выше в жидкостной среде).

При разработках емкостных датчиков низкочастотного (5—20 Гц) жидкостного давления или высокочастотного давления (100 Гц и выше) в газовой среде прогибы центра плоских мембран могут быть повышены (0,1—0,3 мм), при этом резко возрастает чувствительность и значительно повышается нелинейность.

Представляется возможным специальным выбором характеристик мембран, рабочего зазора и геометрических размеров неподвижного электрода обеспечить высокую чувствительность емкостного преобразователя давления с сохранением линейности.

Известно [3], что при больших прогибах плоской, жестко заземленной по контуру мембраны зависимость между величиной прогиба и приложенным давлением является существенно нелинейной. Емкость преобразователя также нелинейно связана с величиной рабочего зазора между его электродами. Таким образом, при определенных геометрических соотношениях возможна линеаризация емкостного преобразователя при больших прогибах мембраны, т. е. при сохранении высокой крутизны преобразования.

На рис. 43 изображен плоский конденсатор, образованный плоским неподвижным электродом радиуса R_1 и упругой мембраной радиуса R . Начальное расстояние между электродом и мембраной обозначим через b . Наибольшую величину прогиба мембраны обозначим через a .

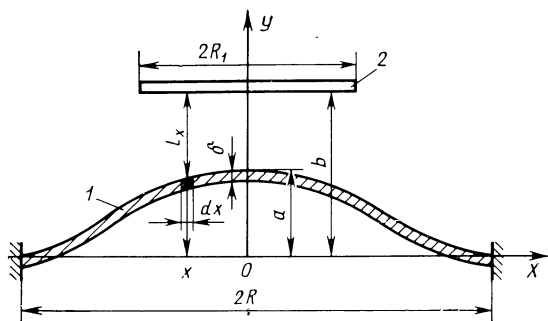


Рис. 43. Геометрия емкостного преобразователя давления:

1 — мембрана; 2 — неподвижный электрод

Для расчета емкости между плоским электродом и мембраной необходимо учитывать кривизну поверхности последней. Для расстояния x величина прогиба [36]

$$a_x = a \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^2.$$

Пренебрегая краевым эффектом ввиду малости рабочего зазора по сравнению с радиусом электрода ($b \ll R_1$), найдем емкость конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_0^{R_1} \frac{2\pi x dx}{b - a \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right]^2} = \frac{\varepsilon R^2}{8b \sqrt{\lambda}} \times \\ \times \ln \frac{1 - \beta \lambda + (1 - \beta) \sqrt{\lambda}}{1 - \beta \lambda - (1 - \beta) \sqrt{\lambda}}, \quad (80)$$

где ε — диэлектрическая постоянная; $\lambda = \frac{a}{b}$ — относительный прогиб мембраны; $\beta = 1 - \left(\frac{R_1}{R} \right)^2$ — параметр, учитывающий геометрию конденсатора.

Начальную емкость преобразователя можно найти из выражения (80) при $\lambda \rightarrow 0$:

$$C_0 = \frac{\varepsilon R^2}{4b} (1 - \beta) = \frac{\varepsilon R_1^2}{4b}, \quad (81)$$

откуда получим окончательную формулу

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon R^2}{4b} \left[\frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \ln \frac{1 - \beta\lambda + (1 - \beta)\sqrt{\lambda}}{1 - \beta\lambda - (1 - \beta)\sqrt{\lambda}} - 1 + \beta \right] = \frac{\varepsilon R^2}{4b} N. \quad (82)$$

Из выражения (82) следует, что изменение емкости преобразователя является сложной функцией от величины относительного прогиба мембраны λ . В свою очередь перемещение центра мембраны связано с приложенным к ней распределенным давлением p следующим образом [3]:

$$p \frac{1}{E} \left(\frac{R}{\delta} \right)^4 = 5,86 \left(\frac{a}{\delta} \right) + 3,58 \left(\frac{a}{\delta} \right)^3, \quad (83)$$

где E — модуль продольной упругости материала мембраны, Н/м²; δ — толщина мембраны, м.

Произведем в выражении (83) замену $a = b\lambda$ и введем обозначение $K = \frac{b}{\delta}$, где K — относительный рабочий зазор преобразователя. Тогда выражение (83) может быть приведено к виду

$$p = E \left(\frac{\delta}{R} \right)^4 (5,86K\lambda + 3,58K^3\lambda^3) = E \left(\frac{\delta}{R} \right)^4 M. \quad (84)$$

Из сопоставления выражений (82) и (84) следует, что линейная функция преобразования

$$\Delta C = \varphi(p) \quad (85)$$

может быть обеспечена только в том случае, если во всем диапазоне изменения относительного прогиба мембраны λ_i с заданной точностью сохраняется равенство $\alpha N_i = M_i$ или

$$\alpha \left[\frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \ln \frac{1 - \beta\lambda + (1 - \beta)\sqrt{\lambda}}{1 - \beta\lambda - (1 - \beta)\sqrt{\lambda}} - 1 + \beta \right] = 5,86K\lambda + 3,58K^3\lambda^3, \quad (86)$$

где α — безразмерный коэффициент пропорциональности, который зависит от K и который необходимо определить.

Вполне очевидно, что линейность емкостного преобразователя зависит как от максимального значения относительного прогиба мембраны λ_{\max} , так и от число конструктивных параметров K и β .

Найдем линейную зависимость

$$\alpha \Delta C_i = p_i A, \quad (87)$$

где A — постоянный коэффициент, который учитывает конструктивные параметры преобразователя и их размерность.

Подставляя в формулу (87) выражения (82) и (84), получим

$$\alpha N_i \frac{\varepsilon R^2}{4B} = E \left(\frac{\delta}{R} \right)^4 M_i A, \quad (88)$$

$$\text{или при } A = \frac{\epsilon R^2}{4bE} \left(\frac{R}{\delta} \right)^4$$

$$\alpha N_i(\lambda_i; \beta) = M_i(\lambda_i; K). \quad (89)$$

Равенство (89) для заданного максимального значения относительного прогиба мембраны λ_{\max} возможно выполнить с ограниченной точностью соответствующим выбором коэффициентов K и β , что в конечном итоге и определяет остаточную нелинейность преобразо-

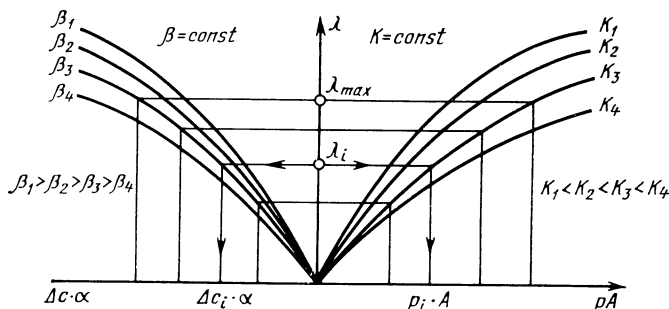


Рис. 44. Зависимость между приложенным давлением p , относительным прогибом мембраны λ и изменением емкости преобразователя ΔC

вателя. Это связано с различием функции $N=f(\lambda)$ и $M=\varphi(\lambda)$. На рис. 44, где представлены совмещенно обе функции, видно их отличие и зависимость от конструктивных параметров K и β .

Коэффициент пропорциональности α целесообразно вычислять по методу наименьших квадратов для заданного диапазона изменения переменной λ по формуле

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n M_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2}. \quad (90)$$

Среднее приведенное относительное отклонение полученной функции от линейной может быть найдено по формуле

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1}{n M_{\max}} \sum_{i=1}^n |\alpha N_i - M_i|, \quad (91)$$

где

$$M_{\max} = 5,86 K \lambda_{\max} + 3,58 K^3 \lambda_{\max}^3.$$

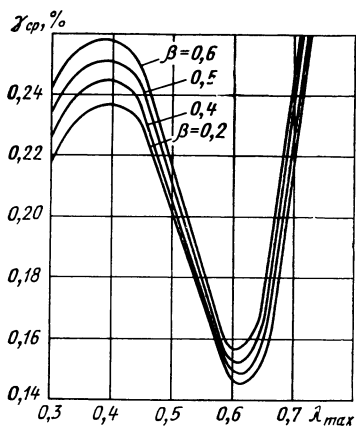


Рис. 45. Зависимость нелинейности преобразователя $\gamma_{ср}$ от максимального относительного прогиба мембраны λ_{max} при оптимальном рабочем зазоре $K_{опт}$

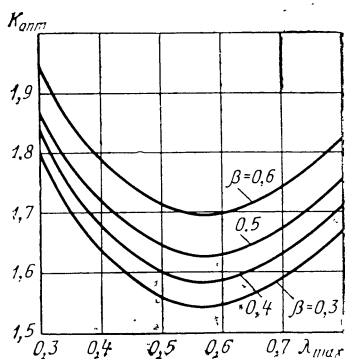


Рис. 46. Зависимость оптимального рабочего зазора $K_{опт}$ от максимального относительного прогиба мембраны λ_{max}

На основании формул (82), (84), (90) и (91) был произведен расчет линейности емкостного преобразователя с использованием ЭВМ; основные результаты расчета приведены на рис. 45 и 46. Из рис. 45 следует, что минимальная нелинейность преобразователя составляет 0,15% и имеет место при максимальном относительном прогибе мембраны $\lambda_{max} = 0,6$. При этом величина относительного рабочего зазора $K_{опт}$ должна быть выбрана в соответствии с рис. 46.

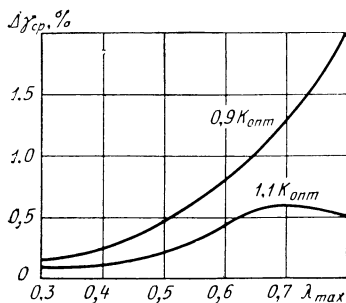


Рис. 47. Зависимость нелинейности преобразователя от изменения оптимального рабочего зазора $K_{опт}$ на $\pm 10\%$

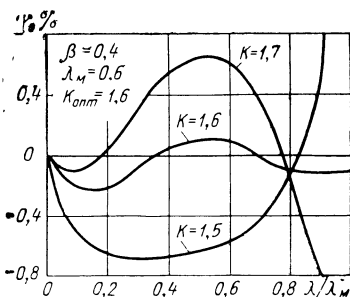


Рис. 48. Нелинейность преобразователя в пределах рабочих прогибов мембраны

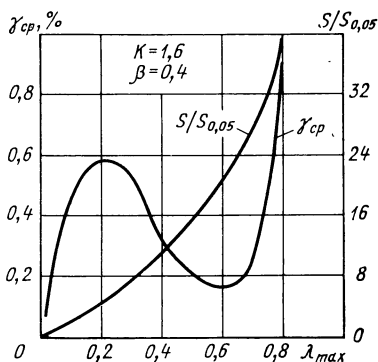


Рис. 49. Зависимость нелинейности преобразователя и его крутизны от λ_{\max}

мембраны λ_{\max} для $\beta=0,4$ и $K=1,6$. Из рисунка следует, что использование преобразователей с большим прогибом мембраны позволяет получить существенный выигрыш (в 10—20 раз) в крутизне преобразования при сохранении малой нелинейности.

Предложенная методика линейаризации может быть использована при проектировании и инженерных расчетах емкостных преобразователей давления различного назначения. В связи с тем, что данная методика расчета произведена на базе расчетной зависимости для малых прогибов мембраны, ее применение целесообразно для значений $K\lambda \leq 1-1,2$.

6. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Проволочные чувствительные элементы. Свойство металлов изменять свое электросопротивление при изменении температуры было положено Каллендаром в 1887 году в основу действия проволочных термометров сопротивления. В настоящее время употребляются термометры сопротивления весьма разнообразных конструкций [13, 88].

Материал проволоки чувствительного элемента термометра сопротивления должен отвечать следующим основным требованиям:

- 1) зависимость электрического сопротивления от температуры в диапазоне измерения должна быть устойчива;
- 2) температурный коэффициент сопротивления (ТКС) должен быть высоким;
- 3) ТКС в диапазоне измерения должен быть постоянным и обеспечивать линейную зависимость сопротивления от температуры;
- 4) удельное электрическое сопротивление материала проволоки должно быть высоким и позволять конструировать датчик температуры с большим сопротивлением при малых его габаритных размерах;
- 5) электрические свойства проводника должны быть воспроизводимы и позволять осуществить взаимозаменяемость датчиков.

На рис. 47 показана чувствительность преобразователя к изменению оптимального рабочего зазора $K_{\text{опт}}$ на $\pm 10\%$. Из приведенных графиков следует, что на линейность преобразователя большое влияние оказывает уменьшение зазора по отношению к оптимальному, нежели его увеличение.

На рис. 48 приведены зависимости нелинейности преобразователя в рабочем диапазоне для трех значений относительного зазора $K_{\text{опт}}$, причем в данном случае $\beta=0,4$, $\lambda_{\max}=0,6$ и $K_{\text{опт}}=1,6$.

На рис. 49 показана зависимость средней нелинейности преобразователя и крутизны преобразования от максимального относительного прогиба

В большей степени этим требованиям отвечают платина и медь, в меньшей степени — никель и железо.

Платина — основной материал для изготовления чувствительных элементов проволоочных термометров сопротивления. Технология получения чистой платины в стране освоена хорошо, и ее достаточно легко изготавливать с высокой воспроизводимостью свойств и сосотава от партии к партии.

ТКС платины приблизительно равен коэффициенту расширения газов $1/273$. Платиновая проволока имеет средний $\text{TKC}_{0-100} = 3,91 \times 10^{-3}$ в интервале температур $0-100^\circ\text{C}$; $\rho = 0,099 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Применяемая для термометров сопротивления платиновая проволока должна иметь гладкую поверхность, без дефектов, должна быть вытянутой из целого, полностью расплавленного и охлажденного слитка, холоднотянутой. Чистоту платиновой проволоки характеризует отношение R_{100}/R_0 , максимальное значение которого для спектрально чистой платины равно 1,3927. Свойства платины, применяемой для термометров сопротивления, регламентированы ГОСТ. Для технических термометров сопротивления отношение R_{100}/R_0 должно быть в пределах 1,390—1,392.

Медь, применяемая в термометрах сопротивления, измеряющих температуру до $150-180^\circ\text{C}$, — металл, обладающий рядом преимуществ. У меди величина ТКС несколько выше, чем у платины ($0,0043-0,0044 \text{ } 1/^\circ\text{C}$). Главным ее недостатком является способность к окислению, но использование медного микропровода со стеклянной изоляцией (метод изготовления лауреата Ленинской премии проф. А. В. Улитского) в значительной степени снижает этот недостаток. Использование медного микропровода (диаметр $0,01-0,02 \text{ мм}$) со стеклянной изоляцией, технология серийного изготовления которого в стране отработана, дает основание рекомендовать его к широкому внедрению в практику проектирования и изготовления миниатюрных термометров сопротивления для измерения температур от -40° до $+200^\circ\text{C}$ с высокими метрологическими характеристиками.

Никель и железо широко в практике не применяют, несмотря на то, что у них высокий ТКС (никель $0,0064 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, железо $0,0065 \text{ } 1/^\circ\text{C}$) и велико удельное сопротивление. Эти металлы сложно получать с воспроизводимыми характеристиками; кроме того, у них сложные зависимости сопротивления от температуры (рис. 50) и они подвержены окислению.

Однако известны прецизионные конструкции датчиков температуры с чувствительными элементами из никелевой проволоки (например, конструкция датчика температуры морской воды разработки ВНИИМ им. Менделеева отличающаяся малой постоянной времени $0,1-0,3 \text{ с}$).

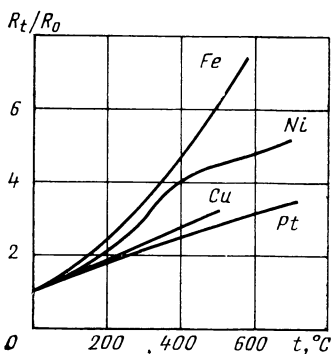


Рис. 50. График зависимости электрического сопротивления некоторых металлов от температуры

ОКБ БИМК ЛЭТИ разработан прецизионный температурный чувствительный элемент, изготовленный из химически чистой платины диаметром 0,03 мм. Теплоприемник выполнен в виде стеклянного прутка диаметром 5 мм методом растягивания стекла в подобии (метод лауреата Ленинской премии проф. Б. В. Перфильева) и имеет два продольных отверстия диаметром 0,1 мм. Провод намотан на теплоприемник бифилярно с шагом 0,1 мм, концы заведены в продольные отверстия. Платиновая проволока покрыта стеклянной пленкой толщиной 0,02—0,03 мм методом спекания на эмали, что обеспечивает герметичность и механическую прочность с высокой надежностью при минимальной постоянной времени [65].

Основные характеристики термисторов. Полупроводниковые терморезисторы (ТР) широко применяют в технике для измерения и контроля температур. На основе ТР разработаны простые и надежные системы дистанционного и централизованного измерения и регулирования температур, а также теплового контроля [83, 84, 108, 109]. В нашей стране имеется ряд промышленных образцов ТР отличающихся высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. В последние годы разработаны промышленные образцы ТР с положительным ТКС (например, типа СТ5-1, СТ6-1А, СТ6-1Б и т. д.).

Основные характеристики и параметры промышленных терморезисторов — термометров сопротивления приведены в работах [108, 109].

К ТР современных температурных датчиков предъявляют ряд специальных требований: миниатюрность, малая постоянная времени, высокая стабильность, линейность статической характеристики в широком диапазоне температур, взаимозаменяемость. Этим требованиям отвечают бусиновые терморезисторы типа СТ3-14, снабженные индивидуальными паспортами, в которых указывают фактические величины сопротивления образцов при 20°C. Эти ТР поставляют комплектами по 3 шт. в каждом, причем гарантируют, что различие в величинах сопротивлений (при 20°C) ТР одного комплекта не превышает 4%, а разброс для них по величинам ТКС не выше $\pm 0,1\%/^{\circ}\text{C}$ (не более $\pm 3\%$ абсолютной величины ТКС).

В биологических температурных датчиках разработки ОКБ БИМК ЛЭТИ нашли широкое применение миниатюрные ТР типа МТ-54 (изготовитель и разработчик Агрофизический институт, Ленинград). Основные характеристики этих ТР даны в табл. 10.

Основные статические характеристики разработанных в последние годы и разрабатываемых в настоящее время полупроводниковых термометров сопротивления [34] даны в табл. 11.

Температурная зависимость сопротивления. Величина сопротивления ТР с отрицательным ТКС в рабочем диапазоне температур изменяется в зависимости от температуры по экспоненциальному закону:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (92)$$

где A и B — постоянные; T — абсолютная температура, К.

Для практических расчетов величины сопротивления ТР при различных температурах окружающей среды можно пользоваться формулой

$$R_{T_2} = R_{T_1} e^{B \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right)}, \quad (93)$$

Таблица 10

Основные характеристики ТР

Наименование параметра	Величина параметра для терморезистора МТ-54М	Примечание
Номинальная величина сопротивления при $+20^{\circ}\text{C}$ (R_{20}), кОм	1—20	Терморезисторы обладают возможностью стерильного введения в различные биологические объекты и среды. Рабочий интервал температур от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$.
Допустимое отклонение величины R_{20} , % от требуемого номинала	± 20	
Максимальная допустимая мощность рассеяния при $+20^{\circ}\text{C}$ (P_{\max}), мВт, не менее	25	
Коэффициент мощности рассеяния H , мВт/ 1°C , не менее	300	
Постоянная времени в спокойной среде τ	Воздух— 10 с, вода—500 мс	
Сопротивление изоляции относительно проводящей внешней среды с температурой $+20^{\circ}\text{C}$, МОм, не менее	500	

где R_{T_2} и R_{T_1} — сопротивления ТР при температурах T_2 и T_1 соответственно.

Величину постоянной B определяют экспериментально измерением сопротивления R при температурах T_1 и T_2 . При этом используют зависимость

$$B = 2,303 \frac{\lg R_{T_2} - \lg R_{T_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (94)$$

При измерениях R_{T_1} и R_{T_2} терморезистор необходимо помещать в ультратермостат (например, типа ТС-15). Температуры T_1 и T_2 должны поддерживаться и измеряться с точностью не ниже $0,05^{\circ}\text{C}$.



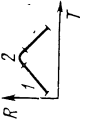
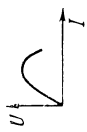
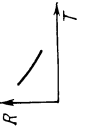


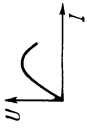
Температурный коэффициент сопротивления ТР в рабочем диапазоне температур изменяется по зависимости

$$\text{TKC} = \alpha_T = -\frac{B}{T^2}. \quad (95)$$

Вольт-амперные характеристики. При использовании ТР в ряде случаев существенное значение имеют их статические вольт-амперные характеристики, определяющие зависимость тока, протекающего через чувствительный элемент, от величины









Таблица 11

Характеристики полупроводниковых термометров сопротивления

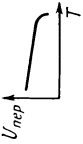

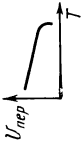
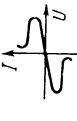
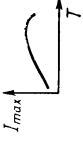
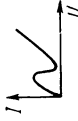
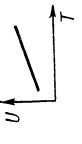
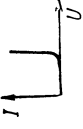
Тип датчика температуры	Температурная характеристика	Вольт-амперная характеристика	Материал	Чувствительность на 1°С
Органические терморезисторы			Полиацетилен, полианилин, полипиррол, простые ион-радикальные соли тетраэтилоксиантрацена	3% и более
Дендритные			Ge Si	3% и более
Выращенные по методу газотранспортных реакций			Ge Si AlSb	До 1%
Полученные по способу Степанова			Ge Si	3% и более

Монокристаллические терморезисторы





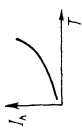

Продолжение табл. 11

Тип датчика температуры		Температурная характеристика	Вольт-амперная характеристика	Материал	Чувствительность на 1° C
Датчики температуры с электронно-дырочными переходами	Диодные			Ge Si	2—3 мВ
				Ge Si	10% и более
	Транзисторные			Ge Si	Более 10%
	Тиристорные			Si	До 20 В

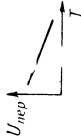

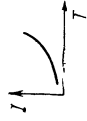

Продолжение табл. 11

Датчики температуры с электронно-дырочными переходами				
Тип Датчика температуры	Температурная характеристика	Вольтамперная характеристика	Материал	Чувствительность на 1° С
Тиристорные с запирающим по управлению электроду			Si	До 50%
На основе симметричных тириستоров			Si	10 В
На основе туннельных диодов			Ge GaAs	3%
Стабилитронные			Si	Γ о 8 мВ

Продолжение табл. 11

Датчики температуры с электронно-дырочными переходами						
Тип датчика температуры	Температурная характеристика	Вольт-амперная характеристика	Материал	Чувствительность на 1°С		
На основе инжекционных диодов			GaAs SiC	2—3 мВ		
На основе фотоприборов			Ge Si	До 10%		
Фототранзисторные			Ge Si	Более 10%		

Продолжение табл. 11

Тип датчика температуры	Температурная характеристика	Вольт-амперная характеристика	Материал	Чувствительность на 1° C
<p>На основе фотоприборов</p> <p>Фотогиристорные</p>			Si	До 20 В
На основе варикапа			Ge Si	До 10%

приложенного к нему напряжения в условиях теплового равновесия между ТР и внешней средой.

Вид вольт-амперной характеристики ТР, помимо его конструкции и габаритных размеров, определяется величиной электрического сопротивления, параметрами полупроводникового материала, средой, которая окружает ТР, ее температурой, а также свойствами тепловой связи ТР с внешней средой. Вольт-амперные характеристики ряда промышленных типов ТР приведены в работе [109].

Инерционность. Тепловая инерционность ТР в основном определяется скоростью восприятия им температуры окружающей среды. О степени тепловой инерционности судят по величине постоянной времени.

За величину постоянной времени бусиновых ТР принимают время, в течение которого температура ТР, предварительно нагретого электрическим током и находящегося в воздушной среде с температурой 20°C, уменьшится в e раз (2,718).

Инерционность ТР зависит от их конструкции и размеров, а также определяется теплопроводностью окружающей среды.

Стабильность и срок службы. Промышленные образцы современных терморезисторов достаточно стабильны, если при эксплуатации их температура не превышает максимально допустимой величины. Характеристики изменения сопротивления некоторых промышленных ТР в результате их длительного пребывания при максимальной рабочей температуре даны на графиках (рис. 51).

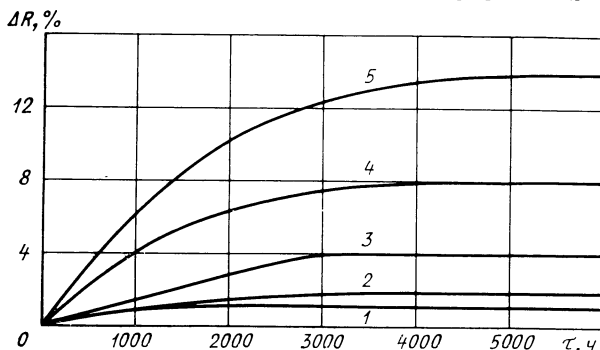


Рис. 51. Изменение сопротивления в результате прогрева терморезисторов при максимальной рабочей температуре:

1 — КМТ-4; 2 — КМТ-17; 3 — ММТ-4; 4 — ММТ-4; 5 — ММТ-6

Изменения этой величины при длительном хранении ТР в нормальных условиях представлены на рис. 52. Максимальный срок службы ТР, гарантируемый техническими условиями, указан в работе [109]. Обычно он составляет не менее 5000 ч. Длительное хранение ТР или их эксплуатация при температурах, не превышающих предельно допустимых значений, улучшает стабильность полупроводникового элемента.

Ограничение срока службы техническими условиями обычно связано с возможным появлением дефектов в металлической арма-

туре или в защитном покрытии. При аккуратном и бережном обращении с ТР и эксплуатации их в нормальных условиях они могут работать значительно дольше, чем указано в технических условиях.

Схемы включения. Высокое электрическое сопротивление ТР позволяет пренебречь сопротивлением подводющих проводов, контактным сопротивлением и ЭДС, что дает возможность измерять температуру на расстоянии в несколько километров от точки изме-

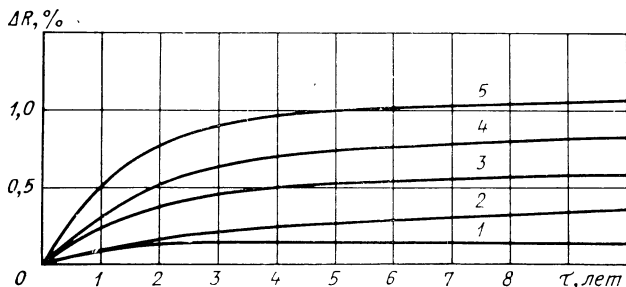


Рис. 52. Изменение сопротивления при хранении терморезисторов при нормальных условиях:

1 — КМТ-8; 2 — КМТ-4; 3 — ММТ-8; 4 — КМТ-1; 5 — ММТ-6

рения. Во всех случаях использования ТР для измерения температуры необходимо ограничить ток, проходящий через чувствительный элемент, чтобы не допустить изменение его сопротивления из-за самонагревания.

ТР включают в основном в мостовые схемы. Разброс электрических характеристик ТР можно скомпенсировать использованием контуров взаимозаменяемости. Схемы включения и методика расчета контуров с ТР подробно рассмотрены в работах [96, 109].

Монтаж терморезисторов. При максимальной допустимой мощности рассеяния температура ТР может достигать 120—180°C и более. В связи с этим их необходимо таким образом размещать и соединять с конструктивными элементами датчика (например, с теплоприемником), чтобы не нарушить функционирование объекта измерений (например, тканей живого организма). Для соединения ТР с теплоприемником целесообразно использовать металлические клеи (например, галлиевые мекладины). Этот вопрос рассматривается в п. 3 гл. VI.

Термисторы выдерживают без механических повреждений и изменения параметров пайку за выводы на расстоянии 10—12 мм от корпуса или в местах, предназначенных для пайки. Можно производить пайку проволочных выводов на расстоянии 5 мм от корпуса, если обеспечить такой теплоотвод, при котором температура ближайшего контактного узла ТР во время пайки не превышала бы максимально допустимую рабочую температуру.

Температурные чувствительные элементы из монокристаллического германия (дендритной ленты). Обычным полупроводниковым терморезисторам, наряду с их высокой чувствительностью и малыми габаритными размерами, свойственен существенный недоста-

ток: эти терморезисторы весьма часто не обладают взаимозаменяемостью из-за сравнительно большого разброса их статических характеристик. Терморезисторы, изготовленные из дендритной ленты германия [56], лишены этого недостатка, причем могут измерять более низкие отрицательные температуры (-196°C и ниже).

Дендритные терморезисторы (ДТ) обладают высокой стабильностью и практически могут служить неограниченный срок. Изменения сопротивлений у ДТ p -типа с удельным сопротивлением $\rho=1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ после хранения в нормальных условиях в течение года, проведенные на партии 50 шт., составляли при ΔR меньше 0,05, 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4% соответственно 30, 20, 30, 10 и 10%.

ДТ в интервале температур от -60 до 100°C имеют линейные статические характеристики (рис. 53), и поэтому их целесообразно применять в качестве чувствительных элементов датчиков температуры.

Температурные характеристики ДТ можно разделить на три участка (см. табл. 11) [34]. Первый участок отвечает выражению $R=R_1+L_1(T-T_1)$, где $L_1>0$ — коэффициент температурной чувствительности, определяемый из выражения $L_1=\frac{R_2-R_1}{T_2-T_1}$ (здесь R_1 и R_2 — экспериментально полученные значения сопротивлений ДТ при $T_1=20^{\circ}\text{C}$ и $T_2=100^{\circ}\text{C}$); второй участок определяется значением сопротивления $R=R_c$, где R_c — некоторая постоянная величина, $L_2=0$; третий участок также имеет линейный характер $R=R_4-L_3(T-T_4)$, где $L_3<0$ — коэффициент температурной чувствительности, определяемый по формуле $L_3=\frac{R_3-R_4}{T_3-T_4}$ (здесь R_3 и R_4 — экспериментально полученные значения сопротивлений ДТ при $T_3=-180^{\circ}\text{C}$; $T_4=140^{\circ}\text{C}$).

Таким образом, при различных температурах на участках 1, 3 и 2 можно получить (см. табл. 11) соответственно положительную, отрицательную чувствительность и нечувствительность к температуре монокристаллических дендритных терморезисторов. Несмотря на относительно невысокую величину температурного коэффициента сопротивления ($\text{ТКС}=5\cdot 10^{-3}\div 8\cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$), дендритные германиевые датчики температуры целесообразно использовать в медицинских и биокрибернетических исследованиях в океанологии. Определенный интерес представляют дендритные чувствительные элементы при разработке термисторов с косвенным подогревом. Они могут также применяться для различных преобразовательных устройств, работающих в условиях низких температур.

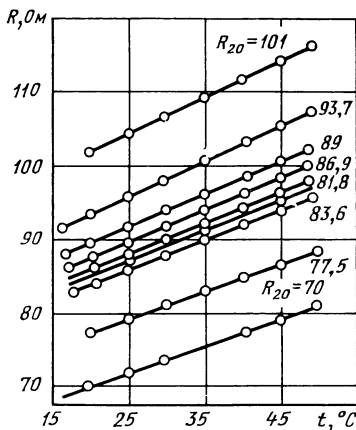


Рис. 53. Статические характеристики дендритных терморезисторов с $\rho=0,9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Высокая чувствительность и точность, линейность выходного сигнала, возможность использования серийно выпускаемых тензорезисторов и упругих чувствительных тензоэлементов, а также технологичность характеризуют эти датчики как наиболее удовлетворяющие современным требованиям. Датчики с наклеенными тензорезисторами могут иметь миниатюрное исполнение [5, 49] с диаметром мембраны 3—3,5 мм. Использование автоэпитаксиальных и гетероэпитаксиальных чувствительных элементов позволяет конструировать датчики давления с наружным диаметром 1,5—2,5 мм. Для микродатчиков давления (точечных) могут быть использованы пьезочувствительные транзисторы. Однако разработка этих датчиков затруднена высоким уровнем шумовых характеристик пьезочувствительных транзисторов [33].

Полупроводниковые тензодатчики давления чувствительны к ударам, вибрациям, ядерной радиации и другим внешним воздействиям, однако основным фактором, вызывающим погрешности в измерениях давления, является изменение температуры окружающей среды. Таким образом, выходной электрический сигнал U_0 датчика давления и его полный дифференциал можно представить в следующем виде:

$$U_0 = f(p, T); \quad dU_0 = \left(\frac{\partial U_0}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial U_0}{\partial T} \right)_p dT \quad (96)$$

и в линеаризованном виде

$$U_0 = \frac{U_0}{p} \bigg|_T p + \frac{U_0}{T} \bigg|_p T; \quad U_0 = S_p p + S_T T, \quad (97)$$

где S_p и S_T — соответственно чувствительность датчика по давлению и температуре.

Линеаризация допустима, поскольку статические характеристики рассматриваемых датчиков [49] линейны в пределах $\pm 1,5\%$ верхнего предела измерений. При испытаниях датчиков на влияние температуры [77] необходимо учитывать не только предельные значения температуры и способы нагрева, но и изменение температуры во времени, причем так, чтобы режим $T_1 = \text{const}$ и $T_2 = \text{const}$ выдерживался в течение времени t_1 , t_2 не менее времени, ожидаемого в условиях рабочих измерений.

Температурные характеристики датчиков должны представляться в виде двух зависимостей:

$$(U_0)_T = f_1(t); \quad T = f_2(t).$$

Если измерения проводятся в условиях изменяющихся температур в широких пределах, то целесообразно использовать схему питания от источника тока [25]. В большинстве случаев исполь-

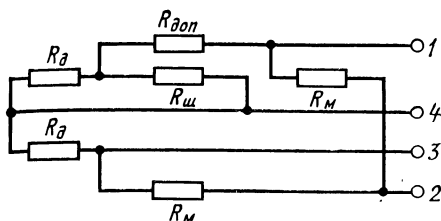


Рис. 54. Схема включения датчика

зуют мостовые схемы. Тензорезисторы включают в смежные плечи моста (рис. 54), чем достигается прямая температурная компенсация. Здесь в схеме $R_{ш}$ — шунтирующее сопротивление (обычно $R_{ш} = 1,5 \div 10$ кОм), обеспечивающее температурную компенсацию второго рода в заданном интервале температур (обычно не более $30-40^\circ\text{C}$). Компенсация температурной зависимости разбаланса моста датчика, состоящего из двух активных тензорезисторов и двух стабильных сопротивлений, осуществляется шунтированием одного из наклеенных тензорезисторов, имеющего большую крутизну зависимости сопротивления от температуры. Для определения этих зависимостей строят кривые $R = f(T)$ для каждого тензорезистора, по меньшей мере, по пяти-восьми экспериментальным точкам в рабочем интервале температур (рис. 55). Параллельно тензорезистору с наибольшей крутизной зависимости $R = f(T)$ подключается магазин сопротивлений 1 (рис. 56) и последовательно магазин сопротивлений 2 для балансировки моста. Последовательным уменьшением величины шунтирующего сопротивления 2 определяют на выходе датчика величину разбаланса моста при изменении температуры датчика в рабочем диапазоне. При получении допустимого разбаланса (при пересчете на температурную чувствительность)

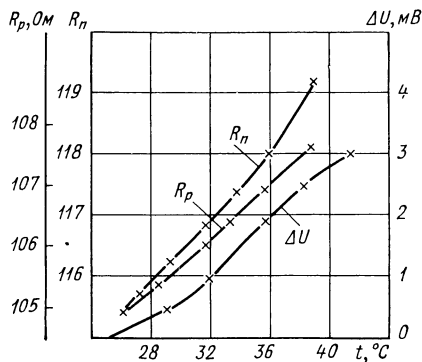


Рис. 55. К термокомпенсации второго рода

тензорезистору с наибольшей крутизной зависимости $R = f(T)$ подключается магазин сопротивлений 1 (рис. 56) и последовательно магазин сопротивлений 2 для балансировки моста. Последовательным уменьшением величины шунтирующего сопротивления 2 определяют на выходе датчика величину разбаланса моста при изменении температуры датчика в рабочем диапазоне. При получении допустимого разбаланса (при пересчете на температурную чувствительность)

фиксируют значения сопротивлений $R_{ш}$ и $R_{доб}$ по магазинам сопротивлений. Указанный способ температурной компенсации тензорезисторных датчиков, включенных по мостовым схемам, является наиболее простым и приемлемым для серийного изготовления датчиков в отличие от других известных методов температурной компенсации

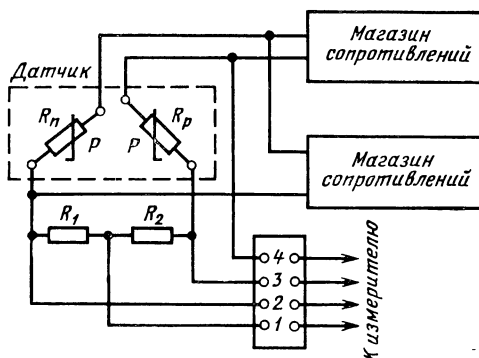


Рис. 56. Схема для определения величины шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ при термокомпенсации датчика

(например, с использованием терморезисторов). Способ шунтирования обладает недостатком — он снижает чувствительность датчика к измеряемому параметру. Однако снижение чувствительности, как правило, невелико и не превышает 5—7%. Температурная характеристика одного из миниатюрных датчиков давления [49] до и после компенсации приведена на рис. 57. Методика расчета тензорезисторных датчиков давления с мембранами различных типов дана в приложении I.

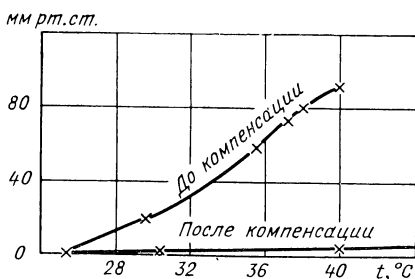


Рис. 57. Температурная характеристика одного из датчиков давления

Технология наклеивания тензорезисторов. Физико - механические свойства связывающих веществ, применяемых для жесткого неразъемного соединения тензо-

резисторов с поверхностью мембраны в значительной степени определяют основные параметры датчика — стабильность и величину дрейфа ползучести) [44, 57, 66]. Применяют различные марки клеев и цемента для соединения тензорезисторов с упругими элементами. Минимальную ползучесть (1,5—3%) из отечественных материалов

дают клеи БФ-2 и ВЛ-931 (ВЛ-7). Технология наклейки тензорезисторов должна включать следующие операции:

Приготовление рабочей поверхности.

1. Поверхность упругого элемента, на которую наклеивают тензорезистор, должна иметь шероховатость, соответствующую не менее чем 8-му классу.

2. Места приклейки должны быть обезжирены четыреххлористым углеродом и промыты спиртом.

Наклейка тензорезисторов клеем БФ-2 по рекомендациям НИКИМПа.

1. Наносят подслой жидкого клея колонковой кисточкой на поверхность упругого элемента (размер дорожки клея должен превышать ширину и длину тензорезистора не менее чем на 1 мм) и выдерживают на воздухе 2 ч, затем производят нагрев до 120°C в течение 2 ч (скорость нарастания температуры 1°C в минуту), выдержку в течение 2 ч при 120°C, охлаждение в термостате до 50°C.

2. Наносят второй слой клея так же, как в п. 1. Толщина двух слоев должна составлять 0,02—0,003 мм.

3. Наносят слой разбавленного клея на приклеиваемую поверхность тензорезистора, выдерживают 2 ч на воздухе.

4. Подслой на упругом элементе ориентируют спиртовым батистовым тампоном, накладывают тензорезистор и выдерживают в течение суток.

5. Производят нагрев до 150°C с прижимом в течение 2 ч и охлаждение в термостате. Прижимание осуществляют через тонкую полиэтиленовую пленку, слой бумаги (писчей и ватмана), слой фетра (толщина 2—3 мм) равномерно распределяемым давлением 1 Н на 1 мм² площади тензорезистора.

6. Затем производят нагрев до 180°C без прижима в течение 2 ч с выдержкой 3,5 ч и охлаждение в термостате.

Сопротивление изоляции наклеенного тензорезистора должно быть не менее 1 МОм.

Один из заводов рекомендует следующие режимы полимеризации:

Клей БФ-2, 2 ч — 20±5°C; 1 ч — 60±10°C; 2 ч — 120±10°C; 2 ч — 160±5°C.

Клей ВЛ-931 (ВЛ7), 1 ч — 20±5°C; 1 ч — 70±10°C; 2 ч — 140±10°C; 2 ч — 180±5°C.

Применяемая в ОКБ БИМК ЛЭТИ технология наклеивания тензорезисторов клеем БФ-2 в основном совпадает с технологией НИКИМПа.

Однако при наклеивании тензорезисторов с базой 2 мм прижим не производят, а тензорезистор «втирают» после покрытия клеем БФ-2 в подслой с последующей выдержкой на воздухе в течение суток, затем производят окончательную полимеризацию слоя клея (до вишневого цвета).

Наклеенные тензорезисторы необходимо защитить влагоустойчивым покрытием. Хорошо себя зарекомендовала мастика, состоящая из 100 в. ч. светлой канифоли, 40 в. ч. пчелиного воска, 50 в. ч. бензоупорной смолы.

Мастику наносят кисточкой на разогретые до температуры 100—120°C тензорезисторы и упругие элементы. Максимальная рабочая температура мастики составляет 40°C.

Миниатюрный внутриполостной датчик давления крови [49].

Общий вид датчика представлен на рис. 58. Колпачковая мембрана толщиной 0,07 мм сварена с корпусом 2 шовной импульсной роликовой электросваркой. Тензорезисторы 1 *p*- и *n*-типа наклеены в центральной части мембраны клеем ВЛ-931. Материал мембраны и корпуса сплав 55ВТЮ.

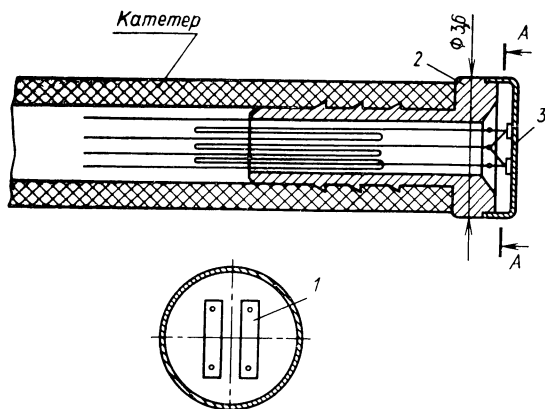


Рис. 58. Внутриполостной датчик давления крови:

1 — тензорезисторы *p*- и *n*-типа; 2 — корпус; 3 — колпачковая мембрана

Основная характеристика датчика

Резонансная частота в воздушной среде, кГц, не менее	5
Резонансная частота в жидкостной среде, кГц, не менее	0,5
Максимальный прогиб центра мембраны, мм	0,02
Пределы измеряемых давлений, мм рт. ст.	от —30 до —1000
Чувствительность, мкв/мм рт. ст.	30
Основная приведенная погрешность, %	$\pm 1,5$
Нелинейность, %, не более	2
Дрейф нуля в интервале температур	от +15 до +40° С, %, не более
Ползучесть за 5 ч работы, %, не более	1,5
Ползучесть за 5 ч работы, %, не более	3
Тензорезисторы типа Ю-8, база 2 мм, рабочий ток питания моста датчика, мА	24
Масса, г	1

Датчик может быть использован для измерения статических и динамических давлений в агрессивных средах.

Полупроводниковый дифференциальный датчик низких давлений [51]. В датчике (рис. 59) применена механическая схема, с жесткой связью мембраны с балкой.

Давление воспринимается прецизионной мембраной 1 с торoidalным краевым гофром и линейной характеристикой. Рабочий диаметр мембраны 30 мм, толщина стенки 0,04 мм. Нелинейность характеристики перемещения центра мембраны при прогибе $\pm 0,25$ мм составляет не более 1%, гистерезис не превышает 0,5%.

Упругая тяга 5 жестко связана с центром мембраны и со свободным концом балки 6 равного сопротивления с наклеенными на нее с двух сторон тензорезисторами. Балка выполнена из сплава 36НХТЮ с термообработкой. В датчике применена конструкция укупорки мембраны, обеспечивающая жесткое герметичное соединение. Красномедная отоженная прокладка 3 вжимается гайкой 4 плоский буртик мембраны 1 в кольцевую выточку в корпусе 2. При этом образуется укупорка «в замок», отличающаяся надежностью. Использование полностью активного моста с тензорезисторами, а также допустимых значений относительных удлинений чувствительных элементов ($\varepsilon = 7 \cdot 10^{-4}$) обеспечило максимально возможную чувствительность. При этом температурная погрешность датчика составила 2—4% в интервале температур 0—50°C. При необходимости указанная величина температурной погрешности может быть снижена известными компенсационными схемами, в простейшем случае — шунтированием одного из тензорезисторов. Для снижения температурной погрешности перспективно также применение новых схем на трансформаторах тока [74].

Измерительная электрическая схема датчика представлена на рис. 60.

Основная характеристика дифференциального полупроводникового датчика давления приведена ниже.

Резонансная частота в воздухе, Гц	1000
Чувствительность, мкВ/мм вод. ст.	100
Максимальная рабочая температура, °C	90
Пределы измерения давлений, мм вод. ст.	± 800
Основная приведенная погрешность, %	$\pm 1,5$
Температурная погрешность в интервале температур 0—50° C, %/° C	0,06
Сопротивление тензорезисторов, Ом	100
Коэффициент тензочувствительности тензорезисторов	120
Масса, г	400

Датчик предназначен для работы при наружном гидравлическом давлении на его корпус до 4 МПа, что в значительной степени определило массивность его конструкции.

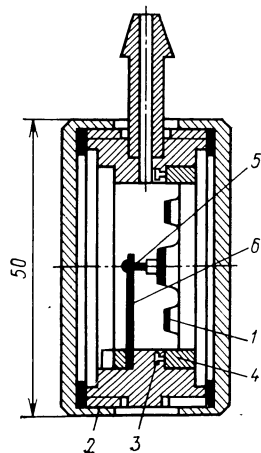


Рис. 59. Дифференциальный датчик низких давлений:

1 — мембрана; 2 — корпус;
3 — прокладка; 4 — гайка;
5 — тяга; 6 — балка

нение в электротехнике для измерения усилий между контактами и токоємниками в электрических элементах (контакты, реле, потенциометры и т. д.), а также для биологических целей.

Полупроводниковый датчик давления почвы [72]. В различных областях агрофизической техники часто возникает необходимость в

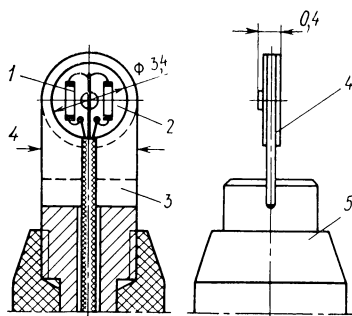


Рис. 61. Полупроводниковый щуп контактных давлений:

1 — тензорезистор типа Ю-8; 2 — мембрана; 3 — основание; 4 — защитная пластина; 5 — рукоятка

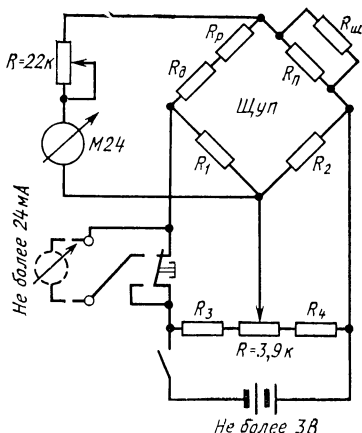


Рис. 62. Схема включения полупроводникового щупа контактных давлений:

R_p и R_n — полупроводниковые тензорезисторы; R_d — добавочное балансирующее сопротивление; $R_{ш}$ — сопротивление шунта термокомпенсации; $R_1 = 22 \text{ кОм}$; $R_2 = 3,9 \text{ кОм}$; $R_3 = R_4 = 510 \text{ Ом}$

измерении давлений в почве (например, при исследовании влияния рабочих органов сельскохозяйственных машин на корневые системы растений, при изучении свойств почв и т. д.). До настоящего време-

Характеристика щупа

Пределы измеряемых усилий, Н	0,01—4
Толщина щупа, мм	0,4
Чувствительность, мВ/Н	20—30
Основная приведенная погрешность, %	± 3
Дополнительная температурная погрешность в интервале $20 \pm 5^\circ \text{C}$, %	2
Температура, $^\circ \text{C}$:	
рабочая	20 ± 5
максимально допустимая	100
Резонансная частота, Гц	20 000
Допустимый рабочий ток тензорезистора, мА	12
Максимальный прогиб центра мембраны, мм	0,015

ни для этого использовали в основном тензометрические проволочные датчики и реже индуктивные датчики давления.

Агрофизическим институтом совместно с ОКБ биологической и медицинской кибернетики ЛЭТИ (Ленинград) разработаны полу-

проводниковые тензорезисторные датчики и многоканальная измерительная установка для измерений давлений в почве в полевых условиях, не требующая усилительных устройств, поскольку эти датчики обладают высокой чувствительностью. В качестве чувствительных элементов в них использованы малогазовые кремниевые полупроводниковые тензорезисторы (ПТ) типа Ю-8 повышенной стабильности.

Датчик (рис. 63) состоит из корпуса 1, выполненного за одно целое с плоской мембраной толщиной 0,4 и 0,6 мм, в зависимости

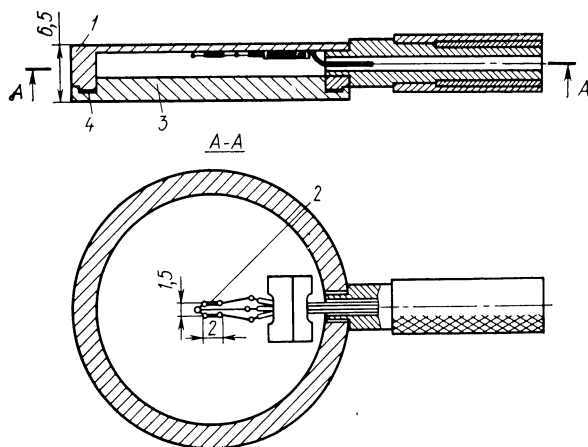


Рис. 63. Полупроводниковый датчик давления почвы:
1 — корпус датчика; 2 — тензорезисторы типа Ю-8; 3 — крышка; 4 — прокладка

от пределов измерений давления (соответственно 0—0,45; 0—1 МПа). Диаметр датчика и рабочий диаметр мембраны соответственно 30 и 25 мм, толщина датчика 6 мм. В центральной части мембраны наклеены два тензорезистора p - и n -типов, составляющие половину моста электрической схемы датчика. Тензорезисторы 2 после наклейки покрывают слоем влагозащитной мастики. Датчик имеет резьбовую крышку 3 и резиновую упоривающую прокладку 4.

Электрическая схема включения датчика приводится в работе [72], также может быть использована схема, представленная на рис. 62.

Основная характеристика датчика

Чувствительность, МВ/МПа	3,0 и 1,5
Пределы измерения, МПа	0—0,45 и 0—1
Основная приведенная погрешность, %, не более	$\pm 1,5$
Рабочий температурный диапазон, °С	5—40

Дополнительная температурная погрешность (без термокомпенсации), $\%/^{\circ}\text{C}$, не бо- лее	0,8
Поперечная паразитная чувствительность, $\%$, не более	3
Резонансная частота в воздухе, Гц, не ме- нее	6000 и 10 000
Модуль объемной упругости, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-5}$	$14,7\cdot 10^{12}$
Ползучесть за 5 ч, $\%$, не более	0,5
Масса датчика с кабелем и разъемом, г . .	270

Датчики могут быть использованы для регистрации измеряемых давлений непосредственно с осциллографом Н-700, при этом применяют гальванометры М 001.1 и М 001.2 и автономный измерительный блок со стрелочным показанием измеряемых давлений.

Полупроводниковый гетероэпитаксиальный датчик высоких давлений. Гетероэпитаксиальный чувствительный элемент выполнен в виде плоской мембраны (диаметр 3 мм, толщина 0,4 мм) из сапфира с нанесенными кремниевыми тензометрическими решетками, образующими полный электрический мост. Сапфировая мембрана заделана в корпус датчика при помощи нажимной гайки с мелкой резьбой (шаг 0,2 мм) и поставлена на эпоксидный компаунд холодного отверждения. Этот способ обеспечивает надежное механически прочное герметичное соединение при высоких давлениях (до 10 МПа). Корпус и нажимная гайка выполнены из сплава Н29К18 (ковар). Схема тензореистивного сапфирового преобразователя и функциональная схема его соединений с измерительной аппаратурой показаны на рис. 64 и 65 соответственно.

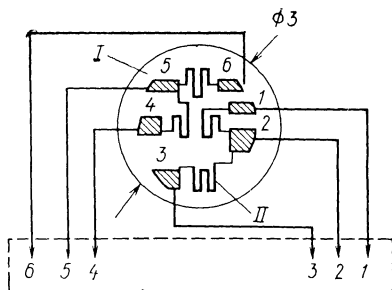


Рис. 64. Схема гетероэпитаксиального сапфирового чувствительного элемента:

I — мембрана из сапфира; *II* — кремниевые тензорезисторы

Основная характеристика датчика

Пределы измеряемых давлений, МПа	0—10
Чувствительность, мВ/МПа	5
Основная приведенная погрешность, $\%$	± 1
Нелинейность, $\%$, не более	1
Температурная погрешность в интервале температур 0—40° С, мВ/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,04$
Допустимый рабочий ток через тензорезистор, мА	1

Высокие метрологические характеристики гетероэпитаксиальных сапфировых тензореистивных датчиков давления (высокий выход-

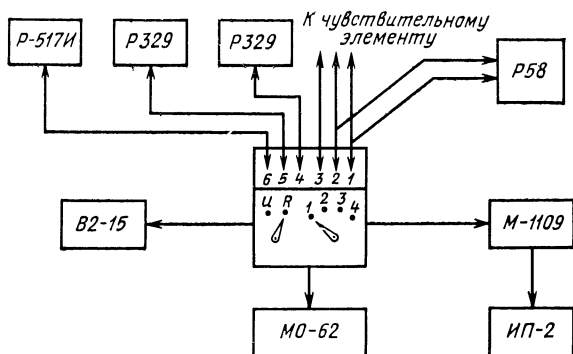


Рис. 65. Схема соединений измерительной аппаратуры

ной сигнал, до 100 мВ, высокая линейность, практическое отсутствие гистерезиса, допустимая температурная погрешность) дают основания рекомендовать их для широкого внедрения в измерительную технику.

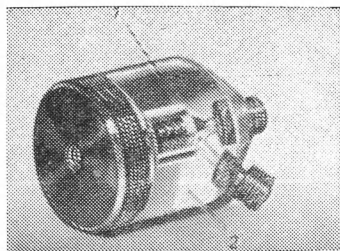


Рис. 66. Выносной датчик давления крови с гетероэпитаксиальной измерительной головкой:
1—гетероэпитаксиальная измерительная головка; 2 — корпус

Полупроводниковый гетероэпитаксиальный датчик давления крови. Гетероэпитаксиальная измерительная головка 1 (рис. 66) размещена в корпусе 2 из органического стекла. Головка поджата к уступу рабочей камеры корпуса при помощи специальной цилиндрической пружины и гайки 3 с постоянным натягом. Плоская сапфировая мембрана диаметром 5,5 мм, толщиной 0,08 мм завальцована в цилиндрический корпус из сплава 55ВТЮ. Четыре гетероэпитаксиальных кремниевых тензорезистора образуют мост датчика.

Основная характеристика датчика

Пределы измеряемых давлений, мм рт. ст.	от —50 до +300
Чувствительность, мкВ/мм рт. ст.	200
Основная приведенная погрешность, %	0,5
Нелинейность, %, не более	1
Температурная погрешность в интервале температур 5—40° С, %	3
Резонансная частота в жидкости, Гц	400

2. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ

При использовании чувствительных элементов Холла для измерения физических и механических параметров, преобразующихся в перемещение (например, давление), необходимо создать пространственно неоднородное магнитное поле по направлению перемещения.

Процессы в элементе Холла можно определить выражением

$$U_x = K_0 I H, \quad (98)$$

где U_x — выходное напряжение элемента; K_0 — коэффициент пропорциональности; I — ток питания; H — напряженность магнитного поля.

Для датчика давления с линейной характеристикой должно быть соблюдено условие

$$U_x = K_1 x = K_1 f(t), \quad (99)$$

где K_1 — постоянный коэффициент; x — смещение элемента Холла или магнитной системы; t — время.

Таким образом,

$$H = \frac{K_1}{K_0 I} f(t) = K_2 f(t), \quad (100)$$

т. е. магнитное поле должно иметь линейную зависимость по направлению перемещения. Линейное магнитное поле может быть создано различными способами [75, 105, 106]. Применительно к миниатюрным датчикам давления может быть использована схема с двумя постоянными магнитами, направленными друг к другу противоположными полюсами [67]. При перемещениях до 0,2—0,5 мм эта схема отличается высокой линейностью.

Высокие метрологические характеристики чувствительных элементов Холла (датчиков Холла), выпускаемых отечественной промышленностью (см. табл. 7), дают базу для разработки датчиков давления класса 1—1,5. Значительный интерес для проектирования миниатюрных и малогабаритных датчиков давления представляют холловские элементы типа Х500 (габаритные размеры $0,8 \times 0,5 \times 0,15$ мм), изготавливаемые из твердых растворов фосфида индия в арсениде индия. Невысокая величина температурного коэффициента ЭДС Холла этих элементов ($\leq 0,02\% / ^\circ\text{C}$) позволяет обойтись без схем температурной компенсации при изменениях окружающей температуры $\pm 20^\circ\text{C}$. Используя аналогичные элементы Холла, можно конструировать датчики давления с наружным диаметром 1,5—2 мм при амплитуде перемещения магнита 0,2 мм, отличающиеся величиной чувствительности, достаточной для технических измерений при высокой температурной стабильности. На рис. 67 показана одна из разработанных конструкций датчика такого типа. Здесь магнитное поле с постоянным градиентом создается перемещающимся керамическим магнитом с конусным торцом, причем нелинейность датчика определения величиной угла конуса магнита и его геометрическими размерами при заданной величине перемещения.

В рассматриваемой конструкции при диаметре магнита 1,5 мм и угле конуса 80° нелинейность датчика не превышает 1,5%. Наружный диаметр датчика может составлять 1,7 мм.

На рис. 68 показана конструкция датчика с плоской мембраной (диаметр 12 мм, толщина 0,15 мм). Этот датчик может быть

использован для измерения давления до 0,1 МПа. Мембрана приварена рельефной конденсаторной сваркой к корпусу 5. В датчике использован безлюфтовый преобразователь линейных перемещений с другим подвесом (коэффициент преобразования 7) Элемент Холла 12, расположенный на свободном конце упругого рычага 4, пере-

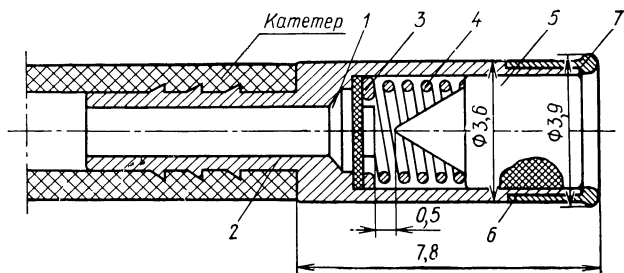


Рис. 67. Миниатюрный внутриполостной датчик давления с чувствительным элементом Холла и конусным магнитом:

1 — чувствительный элемент; 2 — корпус; 3 — кольцо; 4 — пружина; 5 — магнит; 6 — колпачок; 7 — силиконовая пленка

мещается в зазоре магнитной системы, содержащей четыре постоянных магнита (размер $1,5 \times 1,5 \times 0,8$), собранных по схеме $N-S-N-S$ (см. раздел 3 гл. 2). Перемещение элемента Холла в рабочем зазоре составляет $\pm 0,3$ мм при давлении 0,05 МПа, что обеспечивает чувствительность, достаточную для лабораторных и технических измерений (рис. 69).

3. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Емкостные датчики давления широко используются в различных областях техники. Ниже рассматриваются две конструкции емкостных датчиков давления, разработанные в ОКБ БИМК ЛЭТИ и предназначенные для измерения высоких и низких давлений.

Емкостной датчик высоких давлений [68]. Датчик (рис. 70) выполнен в виде цилиндрического корпуса с плоской мембраной — плитой 1 диаметром 11 мм, толщиной 1 мм, изготовленной за одно целое с корпусом. Материал корпуса дисперсионно-твердеющий прецизионный сплав 55ВТЮ (55% ниобия, 39,5% титана, 5,5% алюминия), отличающийся высокими упругими свойствами и стабильностью величины температурного коэффициента модуля продольной упругости.

Жесткий центр мембраны-плиты имеет цилиндрическую шпильку с резьбой малого шага (СПМ1×0,08). На шпильку навинчивают подвижную пластину 2 (диаметр 12 мм). Пластины 3 и 4 неподвижны. При прогибе мембраны с повышением давления емкость между пластинами 2 и 3 увеличивается, а между пластинами 4 и 2 уменьшается. Неподвижные пластины 3 и 4 выполнены в виде фигурных шлифованных металлических дисков со стеклянными цилиндрическими стойками 5, соединенными с дисками и корпусом ме-

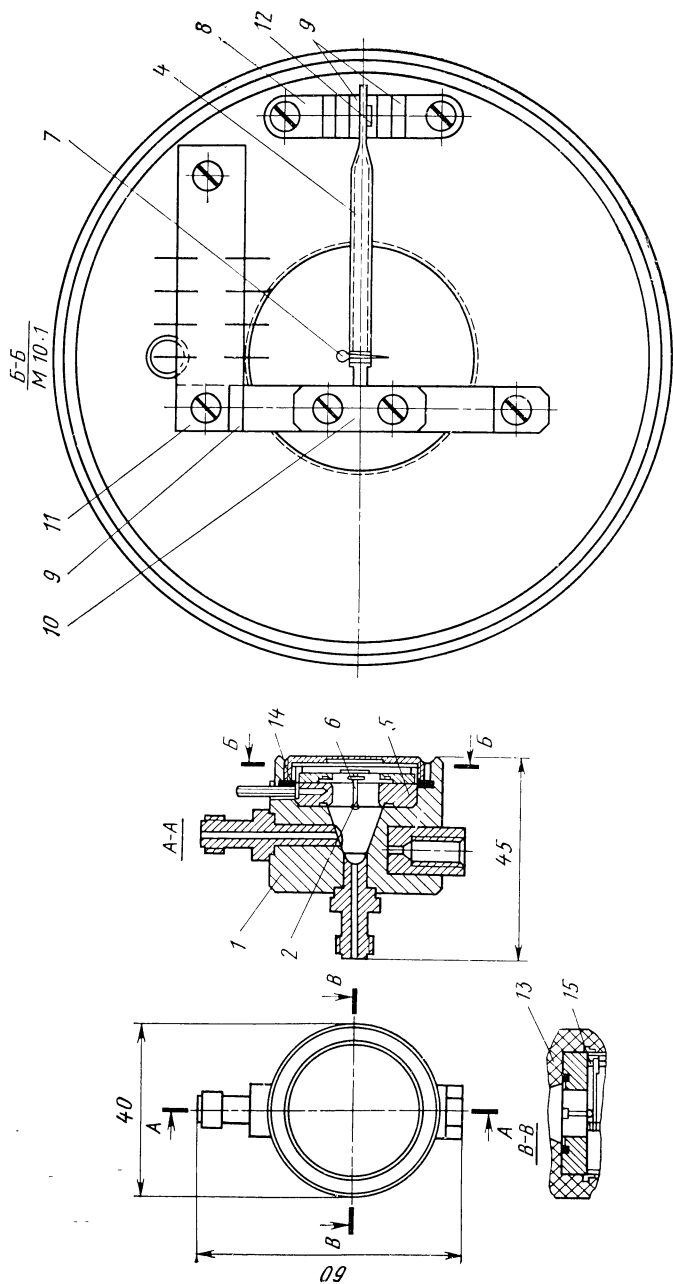


Рис. 68. Датчик давления с чувствительным элементом Холла:
 1 — корпус; 2 — мембрана; 3 — постоянные магниты; 4 — упругий рычаг; 5 — корпус измерительной головки; 6 — тяга; 7 — конический штифт; 8 — ядро магнитной системы; 9 — плата; 10 — накладка; 11 — клеммная плата; 12 — элемент Холла; 13 — камера; 14 — кабельный ввод; 15 — прокладка

тодом спекания на стеклянной эмали с низкой температурой плавления ($\sim 350^\circ\text{C}$).

Эта конструкция обеспечивает наименьшее шунтирующее действие корпуса на неподвижные пластины, а также отличается надежностью и технологичностью изготовления с обеспечением заданного зазора между пластинами с точностью $\pm 0,01$ мм при серийном изготовлении.

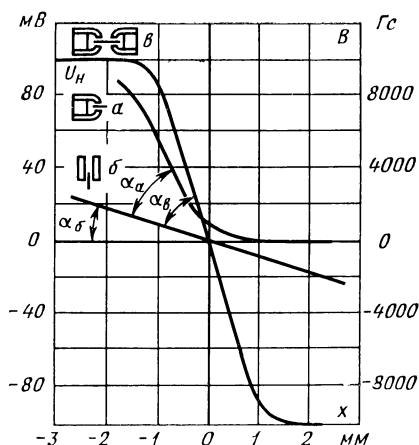


Рис. 69. Зависимость напряжения Холла от перемещения чувствительного элемента Холла в различных магнитных системах:

α — схема $N-S$; β — схема $N-N$; γ — схема $N-S-N-S$

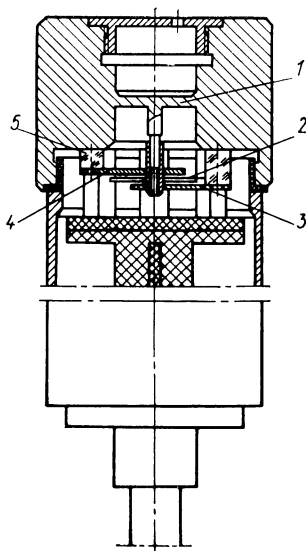


Рис. 70. Измерительная головка емкостного дифференциального датчика давления

Для достижения минимальной температурной погрешности все детали емкостного преобразователя датчика должны быть изготовлены из материалов с возможно близкими по величине коэффициентами линейного расширения. Для сплава 55ВТЮ наиболее полно удовлетворяет этому требованию оптическое стекло марки ЛК6 (для сплава 55ВТЮ $\alpha_t = 80 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ в пределах от -60 до $+20^\circ\text{C}$, для стекла ЛК6 $\alpha_t = 83 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ в пределах от $+20$ до $+120^\circ\text{C}$), из которого выполняют цилиндрические стойки-изоляторы 5. Температурная погрешность емкостного преобразователя не превышает $0,1\% / ^\circ\text{C}$.

Прогиб центра мембраны-плиты при давлении 6 МПа составляет $0,01$ мм.

Начальная емкость между подвижной и неподвижными пластинами составляет $10-11$ пФ. Изменение емкости при давлении 6 МПа равно $0,7-0,9$ пФ.

Принципиальная электрическая схема измерителя давления представлена на рис. 71.

Характеристика измерителя давления

Чувствительность датчика, пФ/МПа	0,1
Пределы измерения, МПа	0—6,5
Основная приведенная погрешность, %	± 1
Температурная погрешность в интервале от —2 до +34° С, %/° С	0,1
Нелинейность, %, не хуже	1
Гистерезис и последствие, %, не более	0,2
Резонансная частота (в воздушной среде), Гц	$9 \cdot 10^4$
Масса датчика, кг	0,4

Емкостный датчик давления крови. В датчике (рис. 72) применен емкостный преобразователь, отличающийся малой температурной погрешностью (см. п. 5 гл. II). Электрическая схема измерителя давления состоит из возбуждающего генератора и четырехдвухпроводного измерительного моста, конструктивно размещенного в стакане датчика. Конденсатор емкостного преобразователя подключен к одному из плеч измерительного моста, питающегося синусоидальным напряжением с частотой 500 кГц. Сигнал рассогласования моста, пропорциональный по амплитуде давлению пульсирующей жидкости, после детектирования поступает на предварительный усилитель и затем через делитель напряжения и инвертор на пиковый детектор, который формирует усредненное максимальное напряжение, пропорциональное систолическому давлению, p_{\max} за время, равное десяти сердечным циклам.

4. СТРУННЫЕ ДАТЧИКИ

Струнный метод измерения различных механических и физических величин, предложенный О. Шифером в 1919 г. и развитый в фундаментальных трудах академика Н. Н. Давиденкова [19], отличается высокими метрологическими характеристиками и широко используется в технике точных статических измерений [1, 47].

Датчики давления, силы, деформаций и перемещений со струнными чувствительными элементами имеют нелинейность характеристики менее 0,1%, порог чувствительности 0,05% от измеряемого давления, температурную погрешность не более 0,1% на 10°С [82].

Возможность использования струнных преобразователей для измерения динамических процессов (например, давления крови) убедительно показана в работах [69, 83].

Динамическая ошибка струнного преобразователя имеет вид

$$\Delta = \frac{h}{8} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left[\frac{\cos \omega t}{(1 - h \cos \omega t)^{3/2}} - \frac{5h \sin^2 \omega t}{4(1 - h \cos \omega t)^{5/2}} \right], \quad (101)$$

где Δ — динамическая ошибка (максимальная, относительная разность ординат двух процессов: идеального и реального — показания струнного преобразователя); h — глубина модуляции, $h =$

$= \frac{1}{2} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0}$; $\Delta \varepsilon$ — амплитуда входного воздействия (деформация

струны); ε_0 — начальная деформация струны; ω_0 — частота собственных колебаний струны; ω — частота входного воздействия.

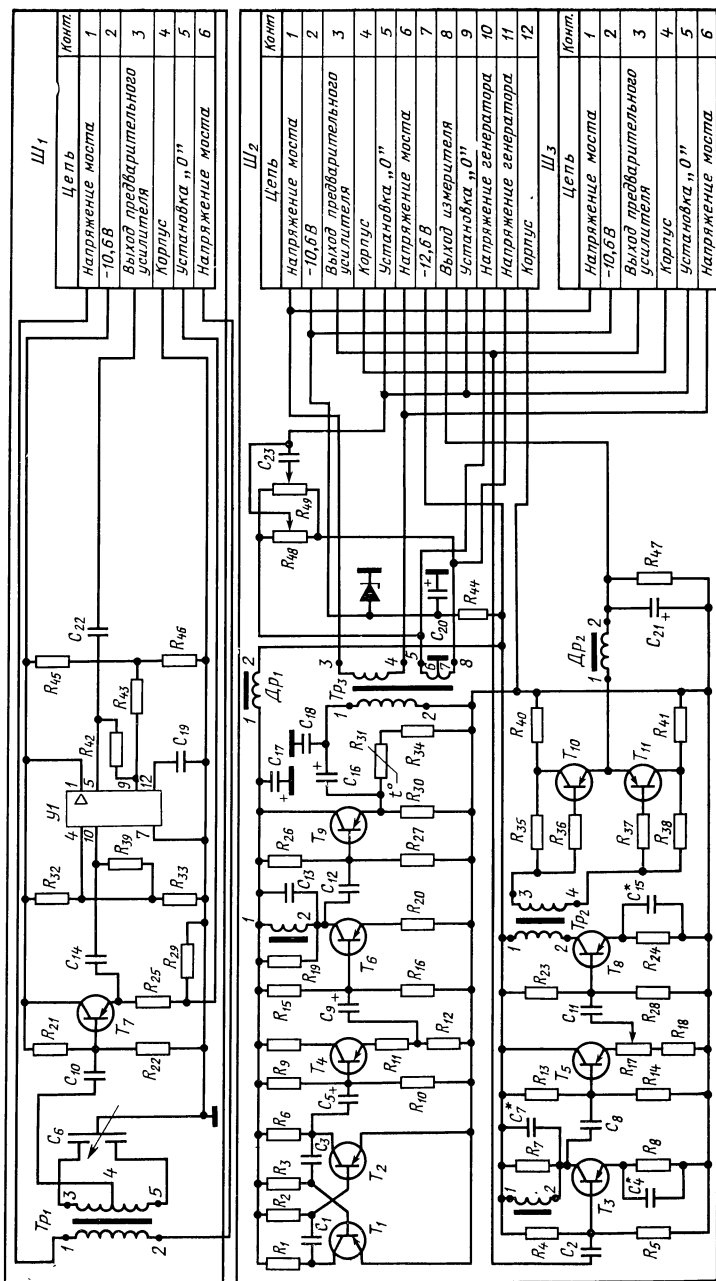


Рис. 71. Принципиальная электрическая схема измерителя давления:

R_1-R_{30} ; $R_{32}-R_{45}$; $R_{46}-R_{47}$ — резисторы типа МЛТ-0,25 (R_1, R_6-750 Ом; $R_2, R_3-9,1$ кОм; $R_4, R_7, R_9, R_{13}, R_{19}, R_{21}, R_{28}, R_{39}, R_{47}-10$ кОм; $R_5, R_{10}, R_{14}, R_{25}, R_{30}, R_{43}-1$ кОм; $R_{11}-820$ Ом; $R_{12}, R_{28}-150$ Ом; $R_{15}-24$ кОм; $R_{17}-360$ Ом; $R_{18}-430$ Ом; $R_{20}-1,2$ кОм; $R_{23}-11$ кОм; $R_{24}, R_{40}, R_{41}-5,1$ кОм; $R_{32}, R_{33}, R_{46}-2,2$ кОм; $R_{44}, R_{45}-1,6$ кОм; $R_{46}, R_{47}-6,8$ кОм; $R_{33}-1,6$ кОм; $R_{42}-82$ кОм; $R_{43}-резистор ММТ-8-820$ Ом; $R_{44}-резистор МЛТ-0,5-100$ Ом; $R_{46}, R_{49}-резисторы СП5-3-220$ Ом; C_1, C_3 — конденсаторы КСО-5-250-Г-2000 пФ; $C_2, C_8, C_{10}, C_{11}, C_{14}, C_{19}, C_{22}-КМ-3а-Н30-0,033$ мкФ; $C_4-КСО-5-250-Г-5100$ пФ; $C_5, C_9, C_{16}-К50-6-15б-6$ мкФ; C_6 — емкостной датчик; $C_7-КСО-5-250-Г-680$ пФ; $C_8-КСО-5-250-Г-200$ пФ; $C_{13}-КСО-5-250-Г-660$ пФ; $C_{15}-КСО-5-250-Г-1000$ пФ; $C_{17}-К50-6-15б-60$ мкФ; $C_{18}-КСО-5-250-Г-4700$ пФ; $C_{20}-К50-6-15б-20$ мкФ; $C_{21}-К50-6-10в-10$ мкФ; $C_{23}-КСО-5-250-Г-2х \times 0,01$ пФ; $Тр_1$ — трансформатор с объемным витком (L_1-2 — на одном кольце, L_2-4 и L_5-4 — на другом кольце, $L_1-2-100$ витков ЛЭШО-7х0,07 в один слой, L_3-4 и L_5-4 по 100 витков ЛЭШО-7х0,07 двойным проводом, сердечник $16 \times 10 \times 4,5$ М2000 НМ1); $Тр_2$ — трансформатор (L_1-2 и L_3-4 по 30 витков ПЭВ-2-0,31, $L_3-4-210$ витков ПЭВ-2-0,31, сердечник $20 \times 12 \times 6$, М2000); $Тр_3$ — трансформатор (L_1-2, L_3-4 — по 100 витков ПЭВ-2-0,12 L_5-6 , L_6-7 — по 8 витков ПЭВ-2-0,2, сердечник $20 \times 12 \times 6$, М2000); $Др_1, Др_2$ — дроссели (по 570 витков ПЭВ-2-0,31 — сердечник $20 \times 12 \times 6$, М2000), $Д_1, Д_2$ — дроссы полупроводниковые Д8148, $Т_1-T_{12}$ — транзисторы ($Т_1, Т_2$ — ГТ308В, $Т_3, Т_4, Т_6, Т_7, Т_{10}, Т_{12}$ — МП42Б, $Т_8$ — П309Е, $Т_9$ — П607); $У_1$ — микросхема 1УТ401А (Б), $Ш_1, Ш_3$ — розетки, РС10А, $Ш_2$ — вилка РС 19А

Показано [100], что при допустимой динамической ошибке измерения 0,1% имеются зависимости: $h \leq 0,35$;

$$\frac{\omega_0}{\omega} \gg 20.$$

Таким образом, струнный метод измерения может быть рекомендован для измерений динамических процессов с частотой колебаний 100—150 Гц, в частности для измерения давления крови в организме человека и животных. Собственная частота колебаний струны длиной l , растянутой между жесткими стойками, определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}}, \text{ Гц,} \quad (102)$$

где F — сила натяжения, Н; m — масса струны, кг; l — длина струны, м.

Эту зависимость можно написать в преобразованном виде

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \text{ Гц,} \quad (103)$$

где σ — механическое напряжение в струне, Н/м²; ρ — плотность материала струны, кг/м³.

Отсутствие зависимости частоты от модуля продольной упругости материала снижает температурную погрешность струнного преобразователя и повышает его метрологические характеристики.

Механические напряжения в струне должны быть в пределах 2—6 МПа. При значениях менее 1,5 МПа колебания струны становятся несинусоидальными. Отношение длины струны к ее диаметру должно быть не менее 250 (при коротких струнах значительно сказываются условия заделки их концов).

Для температурной компенсации необходимо изготавливать все детали электромеханической системы преобразователя (струну, мембрану, корпус, зажимы и т. д.) из материалов с равным коэффициентом линейного расширения. Выполнение этого условия крайне затруднительно. Частоты колебаний струны в датчиках лежат в пределах 400—10 000 Гц. Возможность использования струн малого диаметра (0,01—0,02 мм) определяет возможность разработки миниатюрных струнных преобразователей.

Запись и регистрация измерений может быть произведена на магнитной ленте. Для визуального отсчета частотно-модулированный сигнал поступает на дискриминатор, в выходной цепи которого имеется указывающий прибор. Выходным параметром датчика является частота, это дает ряд преимуществ при работе с ЭВМ.

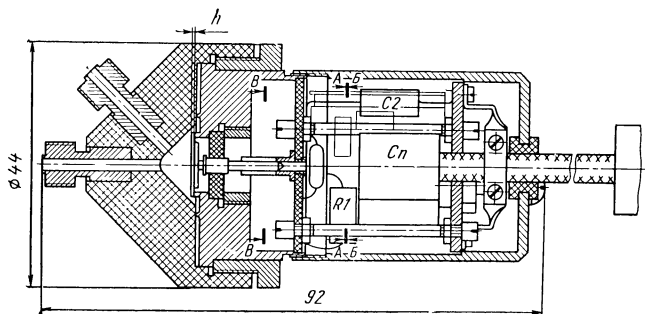


Рис. 72. Емкостный датчик давления с колпачковой мембраной

Для современного приборостроения наиболее интересны струнные датчики с магнитоэлектрическим возбуждением и постоянными магнитами (они отличаются малым потреблением энергии, возможностью миниатюризации, а также относительной простотой конструкции).

Однако эти датчики требуют создания надежного, герметичного, механически прочного и электроизолированного соединения струны с рабочей точкой упругого чувствительного элемента (мембраны, сильфон и т. д.).

Известные способы заделки концов струн — пайкой, точечной сваркой, с помощью винта, в щели, между двумя плоскостями разрезанного по оси конуса, между шлифованными параллельными плоскостями, с помощью обжатия и зачеканки струны в цилиндрическом ниппеле, креплением прижимной планкой с переходом через рубиновый порожек, креплением струны путем намотки ее концов на стальной стержень и обжатия оправкой из листового материала и т. д. [1, 47, 41] — не удовлетворяют этим требованиям.

В разработанной конструкции струнного датчика давления крови (авт. свид. № 357968, бюллетень № 34 1972 г.) в ОКБ БИМК ЛЭТИ (рис. 73) применен новый способ крепления струн. Здесь

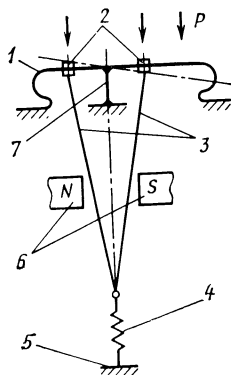


Рис. 73. Схема дифференциального струнного датчика давления:

1 — сильфон; 2 — керамические втулки; 3 — струны; 4 — пружина; 5 — корпус; 6 — постоянные магниты; 7 — ножевая опора

(рис. 74) на конце струны делают кноп (узел), который плотно затягивают в металлической втулке 2 (сплав БНТ) и заливают галлиевым сплавом ГМ-50 (см. п. 3 гл. VI). Затем втулку 2 соединяют с керамической втулкой 3 и чувствительным элементом 4 также с помощью сплава ГМ-50. Эта конструкция соединения испытана, исследована и удовлетворяет предъявляемым требованиям [70].

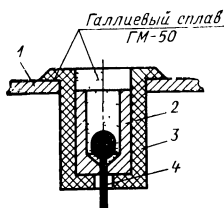
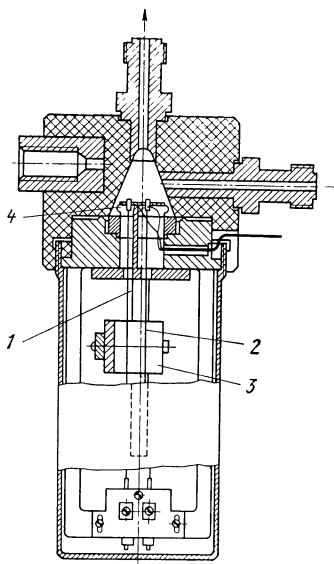


Рис. 74. Конструкция заделки конца струны

Рис. 75. Струнный дифференциальный датчик давления:

1, 2 — струны; 3 — постоянный магнит; 4 — сильфон



В струнном датчике давления (рис. 75) равноплечий поворот торца сильфона относительно оси подвеса создает в струнах равнозначные механические напряжения. Дифференциальность схемы датчика полностью соблюдена.

Одно из основных достоинств схемы датчика заключается в прямой компенсации температурной погрешности. Здесь нет необходимости при разработке производить сложные расчеты размерных

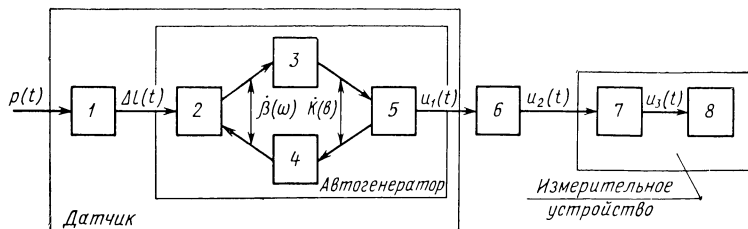


Рис. 76. Функциональная схема струнного датчика:

1 — сильфон; 2 — струны; 3 — приемник колебаний струн; 4 — возбудитель колебаний струн; 5 — усилитель с ограничителем амплитуды колебаний; 6 — измерительный канал; 7 — демодулятор; 8 — выход (регистрирующий прибор)

цепей с целью снижения температурных смещений элементов конструкции. Симметрия конструкции обеспечивает возможность применения материалов с различными коэффициентами линейного расширения.

Функциональная схема струнного датчика показана на рис. 76.

Основные характеристики струнного датчика давления крови

Материал струны — золоченый вольфрам марки ВА-3, \varnothing 0,02 мм	
Выходной сигнал при давлении 300 мм рт. ст., мВ	300
Частота собственных колебаний струн (длина 40 мм), Гц	2350
Частота собственных колебаний струн при давлении 300 мм рт. ст., Гц	2780
Чувствительность:	
Гц/мм рт. ст.	2,8
мВ/мм рт. ст.	1
Погрешность линейности, %	$\pm 0,1$
Гистерезис, %	0,2
Нестабильность характеристики в течение суток, %	$\pm 0,1$
Температурная погрешность на 10° С в диапазоне от +20 до +40° С, %	0,2
Габаритные размеры (диаметр, длина), мм . . .	30×70
Масса, г	60

ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

1. ПРЕЦИЗИОННЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ ПЬЕЗОДАТЧИКИ ВИБРАЦИОННЫХ УСКОРЕНИЙ

Основным типом испытательной аппаратуры, с помощью которой производят измерения параметров вибрации, в настоящее время является электроизмерительная аппаратура с пьезоэлектрическими датчиками, которые непосредственно выдают электрические сигналы, пропорциональные действующим вибрационным ускорениям.

Погрешности указанной виброизмерительной аппаратуры с учетом паразитных поперечных и ротационных чувствительностей находятся в пределах $\pm 8—15\%$, что в ряде случаев не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

В работах [62, 64] рассмотрены прецизионные пьезодатчики, позволяющие значительно повысить точность измерений.

Современные пьезодатчики для измерения параметров вибраций и колебаний должны удовлетворять следующим основным требованиям:

Спектр рабочих частот, Гц	4—10 000
Чувствительность, мВ/г, не менее	30—40
Пределы измеряемых ускорений, g	0,01—100
Изменение чувствительности датчика в диапазоне ускорений от 0,01 до 20 g , %	3
Максимальная относительная поперечная паразитная чувствительность, %	3
Максимальное изменение поперечной чувствительности от -60 до $+60^\circ C$, % от осевой	5
Максимальная относительная ротационная паразитная чувствительность, %	3
Масса датчика, г	10

При измерении параметров вибрации при частоте f измеряемого процесса, близкой к собственной частоте f_0 датчика, чувствительность его возрастает. Уже при $f/f_0=0,1$ частотная погрешность достигает 1%, а при $f/f_0=0,3$ превышает 10%.

Таким образом, для измерения параметров периодической вибрации с частотой 500—600 Гц необходимо иметь датчики с собственной частотой не менее 6—5 кГц.

В настоящее время наиболее перспективны пьезодатчики, в которых инерционный элемент и пьезоэлемент стянуты при помощи тарельчатой пружины.

Основными преимуществами датчика с пружиной по сравнению со склеенными датчиками являются: стабильность частотных характеристик, меньшая величина поперечной чувствительности, несравни-

мо меньший процент брака при изготовлении (5% вместо 20—25% у склеенных датчиков), повышенная надежность.

Если считать, что в процессе работы датчика механический контакт между упругими, предварительно поджатými деталями, не нарушается, то жесткости элементов конструкции будут включены параллельно. В этом случае при суммарной жесткости системы с двумя пьезоэлементами, разделенными металлической диафрагмой-контактом, справедливо выражение

$$C = C_{\text{кор}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{и}} + 2C_{\text{п}} + C_{\text{д}}, \quad (104)$$

где $C_{\text{кор}}$ — жесткость корпуса; $C_{\text{пр}}$ — жесткость пружины; $C_{\text{и}}$ — жесткость инерционного элемента; $C_{\text{п}}$ — жесткость пьезоэлемента; $C_{\text{д}}$ — жесткость диафрагмы-контакта.

Нетрудно показать, что все члены в правой части уравнения, кроме $C_{\text{пр}}$, по крайней мере на порядок выше по сравнению с $C_{\text{пр}}$. Например, $2C_{\text{п}} \approx 2 \cdot 10^6$ Н/см, а $C_{\text{пр}} \approx 2 \cdot 10^4$ Н/см (применительно к датчикам ПКД).

Таким образом, можно считать, что собственная частота колебаний датчика, в котором пьезоэлектрическая пластина имеет малую высоту по сравнению с высотой инерционного элемента, в основном определяется резонансной частотой пластины пьезоэлемента.

Одним из основных условий стабильности частотных характеристик пьезодатчиков с упругими элементами (пружиной) является высокая плоскостность и чистота поверхности соприкасаемых деталей.

Однако даже при десятом классе шероховатости поверхностей и плоскостности 0,002—0,001 мм при наборе пакета деталей возможны пустоты и неполная сопрягаемость деталей, что в ряде случаев и является основной причиной нестабильности частотных характеристик датчика.

Основным способом повышения стабильности работы пьезодатчиков является заполнение всех соприкасающихся деталей датчика невысыхающим силиконовым составом с высокими изоляционными свойствами [63]. В этом случае нет необходимости производить серебрение торцов пластин пьезоэлементов; более того, как показали эксперименты, датчики с пьезоэлементами без серебрения отличаются более стабильными частотными характеристиками и имеют меньшее снижение чувст-

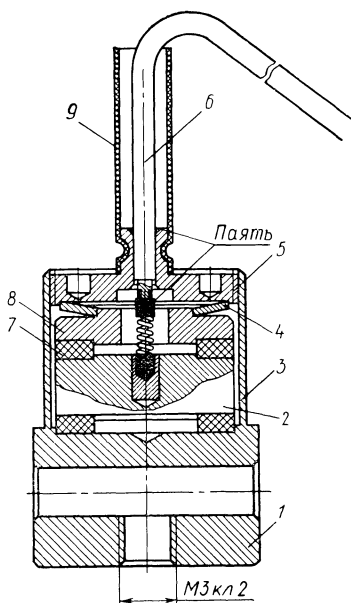


Рис. 77. Пьезодатчик продольных ускорений типа тендем:

1 — корпус; 2 — инерционный элемент; 3 — корпус; 4 — пружина; 5 — гайка; 6 — кабель; 7 — пьезоэлемент; 8 — шайба; 9 — защитная втулка

вительности (завал) на низких частотах (0,5—3 Гц).

На рис. 77 показана конструкция пьезодатчика типа тендем, разработанного автором совместно с проф. Ю. И. Иоришем. Основные характеристики этого датчика приведены ниже.

Чувствительность, мВ/г	30—35
Резонансная частота, кГц	15
Максимальная рабочая температура, °С	200
Изменение чувствительности в диапазоне ускорений от 0,05 до 50 g, %	5
Максимальная относительная поперечная чувствительность, %	3—5
Максимальное изменение поперечной чувствительности в интервале температур от —60 до +60° С, %	5
Пределы измерений вибрационных ускорений, g	0,01—200
Сопротивление изоляции, МОм	2000
Емкость с кабелем, пФ	110±25
Масса датчика, г	12

Для измерения параметров вибраций живого организма наибольший интерес представляют трехкомпонентные датчики, одновременно выдающие сигналы компонент ускорений по трем ортогональным осям.

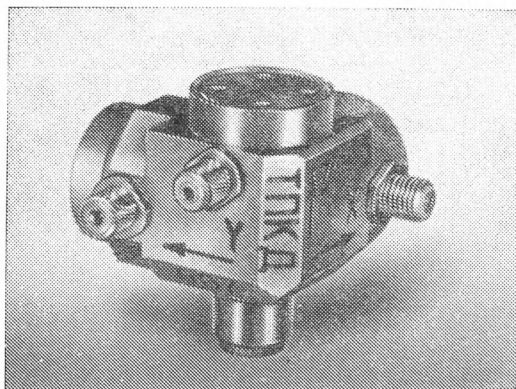


Рис. 78. Внешний вид трехкомпонентного датчика вибрационных ускорений типа ТПКД

На рис. 78 показан внешний вид одного из разработанных трехкомпонентных датчиков, конструкция и характеристики которого рассмотрены в работе [62].

2. ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ПАРАЗИТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ РОТАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Произвольное движение твердого тела определяется тремя линейными смещениями $S_x(t)$, $S_y(t)$, $S_z(t)$; тремя угловыми смещениями $\beta_x(t)$, $\beta_y(t)$, $\beta_z(t)$ и выбранной точкой измерения. Вопрос о выборе системы координат рассмотрен в работе [27]. Пьезодатчик, предназначенный для измерения одного линейного компонента, например $S_z(t)$, претерпевает действие неизмеряемых остальных пяти компонентов, причем это действие отрицательно сказывается на точности измерения компонента $S_z(t)$.

Современные прецизионные пьезодатчики (например, для измерения параметров вибрации гироскопических устройств) должны иметь достаточную чувствительность по оси измерения и малую чувствительность к неизмеряемым компонентам как линейных, так и ротационных колебаний. Паразитная чувствительность к линейным компонентам $S_x(t)$ и $S_y(t)$ названа поперечной (боковой), к компонентам $\beta_x(t)$ и $\beta_y(t)$ — экваториальной ротационной и к компоненту $\beta_z(t)$ — полярной ротационной. Вопрос приобретает актуальность в связи с тем, что в некоторых конструкциях пьезодатчиков паразитная чувствительность может достигать 25—40% полезного сигнала. Поперечная чувствительность пьезодатчиков изучена достаточно полно как теоретически [27, 29, 79], так и экспериментально [63].

В результате проведенных исследований по снижению поперечной паразитной чувствительности пьезодатчиков можно сделать следующие выводы.

1. Склеенные датчики, как правило, обладают большими значениями поперечной чувствительности даже в центрированных конструкциях (в которых центры масс инерционного элемента и пьезоэлемента совмещены) по сравнению с датчиками с пружиной.

Использование металлического клея типа мекладин повышает полезную чувствительность пьезодатчиков и соответственно снижает относительную паразитную поперечную чувствительность [87], однако отработать серийное производство этих датчиков с поперечной чувствительностью менее 8—10% и приемлемым процентом брака практически не представляется возможным.

2. Из центрированных датчиков с пружиной следует отдать предпочтение датчикам типа тендем с двумя кольцевыми пьезоэлементами. Путем взаимного разворота пьезоэлементов поперечная чувствительность датчиков может быть снижена до 3—5% при серийном изготовлении [63].

3. Во всех случаях высота инерционного элемента не должна превышать десятикратной толщины пьезоэлемента.

4. Прецизионные пьезодатчики с поперечной чувствительностью менее 1—2% могут быть получены лишь путем отбора из значительных партий датчиков (не менее 50—100 шт.).

Ротационная чувствительность пьезодатчиков исследована мало [87, 28]. Однако известно, что при определенных условиях она может быть значительной и иметь величину одного порядка с поперечной чувствительностью.

Для количественной оценки ротационной чувствительности важно не ее абсолютное значение, а отношение к чувствительности по

оси измерения датчика. Однако это значение получить трудно, так как рассматриваемые чувствительности имеют разную размерность. Как показали эксперименты [28, 71], целесообразно за относительную ротационную чувствительность принять величину

$$\rho_{\text{рот.отн}} = \frac{e_{\text{э.р}}}{e_{\text{э.з}}} 100\%, \quad (105)$$

где $e_{\text{э.р}}$ — эффективное значение напряжения, снимаемого с датчика при приложении ускорения $\ddot{s} = s_a \sin \Omega t$ на плече стандартной длины, равной 100 мм (рис. 79); $e_{\text{э.з}}$ — эффективное значение напряжения, снимаемого с датчика при приложении того же ускорения $\ddot{s} = s_a \sin \Omega t$ вдоль оси измерения Z .

Величина стандартной длины в 100 мм выбрана не случайно. При такой длине плеча величина ротационной чувствительности имеет тот же порядок, что и поперечная чувствительность применительно к современным пьезодатчикам.

Для исследования ротационной чувствительности необходимы специальные испытательные стенды. Эти стенды должны отвечать следующим основным требованиям: иметь частотный диапазон от 1—3 Гц до 15—20 кГц, вращающая опора стенда должна быть безлюфтовой; каретка для закрепления испытуемого датчика должна перемещаться микрометрически с жесткой фиксацией; стенд должен иметь контрольный датчик, должна быть предусмотрена оптическая головка с окулярным измерителем для измерения амплитуд вибрационных смещений, электродинамическая система стенда должна развивать вибрационное ускорение испытуемого датчика не менее 1 g, конструкция стенда должна быть жесткой; в стенде должно быть предусмотрено измерение как экваториальной, так и ротационной чувствительности; в стенде должна быть предусмотрена возможность максимально точного совмещения «измеряющей» точки датчика I с осью вращения; для исключения эффекта «отдачи» от вибрации основания последнее должно быть вполне массивным.

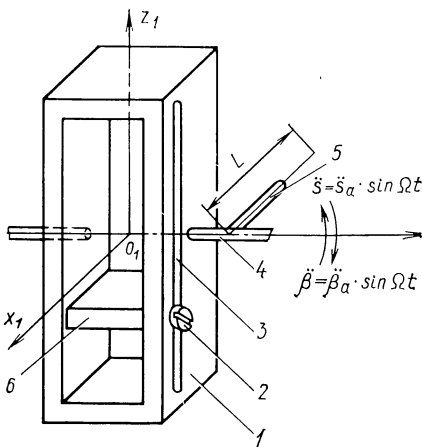


Рис. 79. Принципиальная схема установки для определения ротационной чувствительности датчика и нахождения его измеряющей точки:

1 — рама; 2 — стопорный винт; 3 — прорезь; 4 — ось вращения; 5 — выносное плечо; 6 — каретка для крепления датчика

В соответствии с этими требованиями разработаны и исследованы две конструкции электродинамических стендов [71]. Эти конструкции отличаются тем, что стенд, схема которого показана на рис. 80, — консольного типа, в то время как стенд другой схемы имеет две опоры (рис. 81). В качестве магнитной системы стендов

использован мощный постоянный магнит от калибровочного возбуждителя типа 4290 фирмы Брюль и Кьер.

Для снижения магнитных рассеиваний и увеличения жесткости конструкции большинство деталей стенов выполнено из антимагнитных прочных металлов (дюралюминий, титановые сплавы).

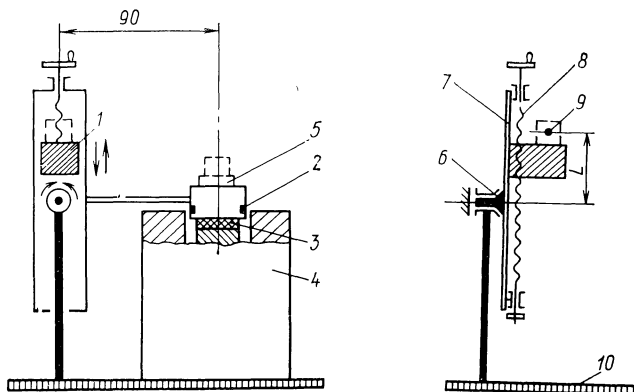


Рис. 80. Схема стэнда консольного типа:

1 — каретка; 2 — силовая обмотка; 3 — поролюновая прокладка; 4 — постоянный магнит; 5 — контрольный датчик; 6 — конусная опора скольжения; 7 — направляющая; 8 — микрометрический винт; 9 — испытуемый датчик; 10 — основание

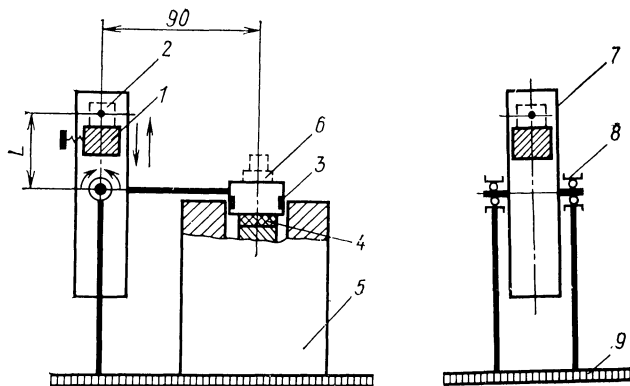


Рис. 81. Схема стэнда с двумя опорами:

1 — скалка; 2 — испытуемый датчик; 3 — силовая обмотка; 4 — поролюновая прокладка; 5 — постоянный магнит; 6 — контрольный датчик; 7 — направляющая; 8 — шариковый подшипник; 9 — основание

Исследования показали, что резонансная частота стенда консольного типа составляет 260—270 Гц, а стенда с двумя опорами 300—310 Гц. При питании силовой обмотки стендов от звукового генератора типа ЗГ-16А в испытуемых датчиках (массой до 50 г) возникают вибрационные ускорения до 1,2g. Испытуемые датчики закрепляются на стенде при помощи специального шарнирного переходника, что обеспечивает необходимую юстировку «измеряющей» точки датчика с осью вращения. Для выявления эффекта удвоения частот гармонических колебаний [29] в комплекте измерительной аппаратуры должно быть предусмотрено специальное электронное устройство, например анализатор спектра частот типа АСЧХ-1.

Испытания различных типов пьезодатчиков (ПКД, ТПКД, ПДУ-1, 1ПА-9, ВП-3 и т. д.) на обоих стендах дают результаты, близкие по своим значениям, в эксплуатации же стенд консольного типа несколько проще.

В результате исследований установлено, что:

1) при стандартной длине колебательного плеча 100 мм (см. рис. 79) у нецентрированных пьезодатчиков относительная ротационная чувствительность приблизительно имеет ту же величину, что и поперечная чувствительность;

2) в центрированных датчиках ротационная чувствительность в 3—4 раза меньше, чем в нецентрированных.

ДАТЧИКИ ГАЗОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Современное состояние вопроса рассматривается в работах [39, 80]. Достижения полупроводниковой тензометрической и гальваномангнитной техники создают базу для разработок конструкций газовых расходомеров различных назначений, отличающихся высокими метрологическими характеристиками и надежностью при простоте конструкции. Ниже рассматривается несколько конструкций полупроводниковых газовых расходомеров, разработанных автором в ОКБ БИМК ЛЭТИ и на кафедре БИМК СЭПИ.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Мембранный датчик. По внешнему виду (рис. 82, 83) этот датчик напоминает широко известные расходомеры переменного перепада с диафрагмой. Однако здесь диафрагма выполнена в виде упругой тонкой (толщина 0,1 мм) мембраны 1 с центральным отверстием. Мембрана под действием динамического давления воздушного потока прогибается, при этом возникают напряжения рас-

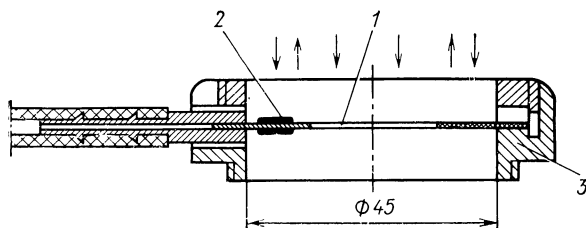


Рис. 82. Полупроводниковый мембранный датчик расхода

тяжения и сжатия в полупроводниковых тензорезисторах 2, размещенных на мембране в месте ее заделки в корпус 3 прибора. Сопротивление тензорезисторов, включенных в измерительные электрические схемы, изменяется в зависимости от величины расхода газа — в этом и заключается принцип работы прибора. Методика расчета

датчиков расходомеров этого типа дана в приложении II. В общем случае эти датчики нелинейны. При $\frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \approx 10$ нелинейность датчиков, как правило, не превышает 5%, что отвечает требованиям к современным датчикам и, в частности, к датчикам вентиляции

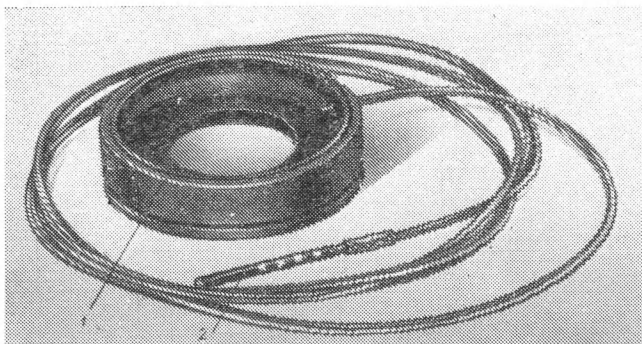


Рис. 83. Внешний вид датчика расхода:
1 — датчик; 2 — миниатюрный штеккер штепсельного разъема

онной функции человека и животных [8]. Рассматриваемая конструкция специально создана для измерения параметров дыхания морских животных и является составной частью комплексного устройства для исследования энергозатрат.

Одна из экспериментальных статических характеристик датчика, полученных на газомерной установке ВНИИМ им. Менделеева, представлена на рис. 84. Высокая чувствительность, незначительное сопротивление дыханию 2—5 мм вод. ст., малая постоянная времени ($f_{\text{рез мембраны}} > 500$ Гц), простота конструкции и надежность делают этот тип датчиков перспективным для измерения параметров вентиляционной функции человека и животных, а также для общетехнических целей.

Датчик расхода с крыльчаткой. В этом типе датчика (рис. 85) задача измерения объема вдыхаемого (выдыхаемого) воздуха сводится к измерению числа импульсов, поступающих с тензорезисторного моста (валик 1 крыльчатки 2 имеет четырехгранный кулачок 3, находящийся в соприкосновении с концом тензомет-

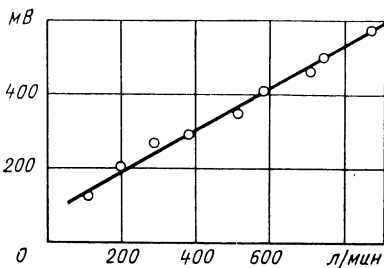


Рис. 84. Статическая характеристика датчика

рической балки 4. За один оборот крыльчатки тензорезисторный мост выдает четыре импульса). Частотный выход имеет преимущества при подключения датчика к биотелеметрическому каналу. В стационарных условиях сигнал с датчика поступает на усилитель (рис. 86), а затем на формирующее устройство ТШ (триггер Шмидта). Сформированные импульсы, пропорциональные объему выдыхаемого (вдыха-

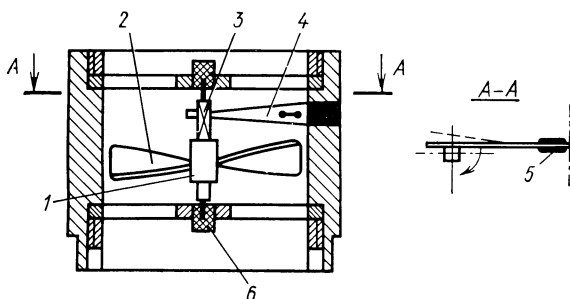


Рис. 85. Полупроводниковый тензометрический датчик с крыльчаткой:

1 — валик; 2 — крыльчатка; 3 — кулачок; 4 — тензометрическая балка; 5 — тензорезисторы; 6 — опора скольжения (проходной и накладочный камень)

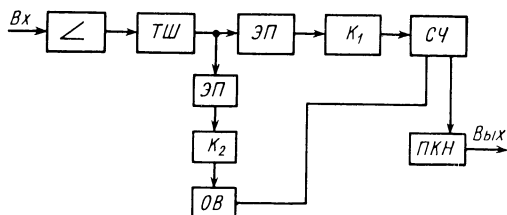


Рис. 86. Функциональная схема прибора для измерения параметров дыхания:

V_x — входной датчик; < — усилитель; ТШ — триггер Шмидта; ЭП — эмиттерный повторитель; K_1 , K_2 — ключи; СЧ — счетчик; ПКН — преобразователь код — напряжение; ОВ — одновибратор

емого) воздуха, поступают через эмиттерный повторитель ЭП и ключ K_1 в счетчик СЧ. Затем происходит преобразование импульсов кода в напряжение преобразователя код—напряжение (ПКН). На выходе прибора напряжение пропорционально объему воздуха на вдохе (выдохе). С триггера Шмидта через эмиттерный повторитель ЭП и ключ K_2 сигнал поступает также на одновибратор ОВ, который открывает счетчик на время поступления сигнала.

Прибор дает возможность получить запись кривой объемов вдоха (выдоха) в виде экстремальных значений за каждый дыхательный цикл. По кривой можно определить частоту дыхания. Запись

параметров дыхания производят на быстродействующем самопишущем приборе типа НЗ20-5. При движении объекта исследования определение параметров дыхания производят подключением датчика к передатчику биотелеметрического канала. В этом случае функциональная система канала измерения параметров дыхания имеет вид, представленный на рис. 87.

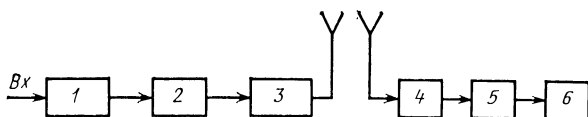


Рис. 87. Функциональная схема биометрического канала:

1 — датчик; 2 — согласующая схема; 3 — передатчик; 4 — приемник; 5 — прибор для регистрации параметров дыхания; 6 — регистрирующее устройство

Передающий блок, установленный на объекте исследования, обеспечивает излучение сигнала в воду. Передатчик 3 излучает АИМ—ЧМ сигналы путем непосредственной гальванической связи выходного каскада с водной средой, создавая в годной среде контурные токи. Эти токи могут быть приняты непосредственно при помощи гальванических связей входных цепей приемного блока с водной средой, а также использованием приемных антенных систем.

Задачей приемного блока является усиление принятого антенной ЧМ сигнала и его детектирование. Дальнейшая обработка сигнала аналогична стационарному случаю.

Основные характеристики датчика и прибора следующие.

Датчик

Порог чувствительности тахометрического дат-

чика расхода, л/мин 15

Диаметр турбинки (крыльчатки), мм 45

Число лопастей 8

Число импульсов за один оборот 4

Число импульсов за один литр прошедшего воздуха 15,3

Величина сопротивления тензорезисторов типа

Ю-8 моста датчика, Ом:

R_1 104,83

R_2 104,85

Нелинейность зависимости частоты импульсов

датчика от объемной скорости дыхания, %, не более 4

Прибор

Питание моста датчика 0,45 В;
 $f=90$ кГц

Коэффициент усиления K 400

Емкость счетчика, импульсы 512

Время выдержки информации о величине объема дыхания, с 5

Выходное сопротивление прибора R , кОм 1,2

К недостаткам датчика следует отнести значительную величину постоянной времени, что определяется наличием турбинки. Отсутствие температурной погрешности является крупным преимуществом датчиков этого типа.

Датчик расхода с сетчатым чувствительным элементом. Здесь в воздушном потоке размещен подвижный легкий диск 1 (рис. 88,

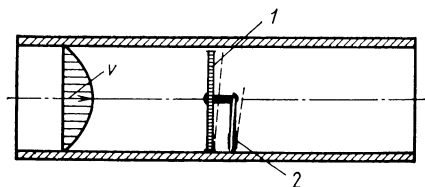


Рис. 88. Полупроводниковый тензометрический датчик расхода с подвижным сетчатым диском:

1 — поворотный диск с отверстиями; 2 — тензометрическая балка

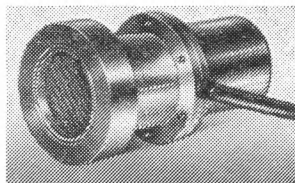


Рис. 89. Внешний вид полупроводникового тензометрического датчика параметров дыхания

89) с отверстиями. Центр диска связан с концом тензометрической балки 2 равного сопротивления. Под воздействием гидродинамических сил потока газа диск отклоняется совместно с концом балки, при этом возникает выходной сигнал разбаланса тензометрического моста.

Высокая чувствительность полупроводниковых тензорезисторов позволяет выполнять подвижный диск с весьма малым воздушным сопротивлением (до 10 Па), при этом отношение $\frac{S_{отв}}{S_{пер}} > 10$, где $S_{отв}$ — площадь отверстий в диске, $S_{пер}$ — площадь перемычек.

Таким образом, диск практически не нарушает ламинарного потока в патрубке датчика и обеспечивает линейность его характеристики в достаточно широких пределах. Экспериментальным путем установлено, что круглые отверстия в диске в меньшей степени нарушают ламинарность потока, чем квадратные (использование металлической сетки в качестве диска).

Основная характеристика датчика приведена ниже.

Порог чувствительности, л/мин	1
Пределы измерения, л/мин	5—100
Диаметр проходного сечения, мм	30
Гидродинамическое сопротивление, Па	30
Нелинейность, %, не более	5
Чувствительность, мкВ/ л/мин	100
Масса, г	50

Простота конструкции, отсутствие усилительных устройств, достаточная линейность характеристик, а также возможность использования серийно выпускаемых тензомодулей позволяют рекомендо-

вать этот тип датчиков в разработках устройств для измерения параметров вентиляционной функции человека и животных и для общетехнических целей.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЙ ДАТЧИК

В этом типе датчика (рис. 90, 91) в воздушном потоке также размещен подвижный легкий диск с отверстиями. Диск закреплен на плоской пружине. На диске закреплен датчик Холла, перемещающийся в магнитном зазоре системы. Под действием гидродинамиче-

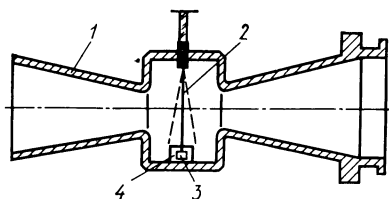


Рис. 90. Гальваномагнитный датчик расхода:

1 — корпус; 2 — диск с отверстиями; 3 — элемент Холла; 4 — магнитная система

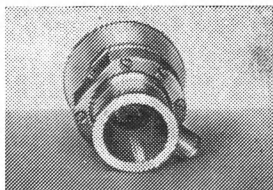


Рис. 91. Внешний вид гальваномагнитного датчика расхода

ских сил потока воздуха диск отклоняется и датчик Холла перемещается в магнитной системе на определенный угол. При малых углах поворота (до $3-5^\circ$) нелинейность этого преобразователя не превышает 1—2%. Электрический нуль сигнала устанавливают грубо перемещением магнитной системы, точно — подстроечным сопротивлением схемы. Датчик в целом электрически и механически симметричен и имеет равнозначную чувствительность при реверсировании потока, в чем заключается одно из главных его преимуществ. Использование современных плоских интерметаллических постоянных магнитов позволяет размещать в конструкции датчик Холла неподвижно, а магнитную систему — на подвижном диске. Эта схема резко упрощает монтаж токоподводов датчика Холла и повышает надежность работы устройства в целом. К недостаткам датчика следует отнести невысокую чувствительность.

Выпуск серийных отечественных датчиков Холла с высокими метрологическими характеристиками выдвигает этот тип расходомеров в число перспективных.

Основная характеристика датчика приведена ниже.

Порог чувствительности, л/мин	4
Пределы измерений, л/мин	5—100
Диаметр проходного сечения, мм	25
Гидродинамическое сопротивление, Па	50
Нелинейность, %, не более	5
Чувствительность, мкВ/л/мин	10
Масса, г	60

3. НАПОРНЫЙ РАСХОДОМЕР С ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ [9]

Расходомер показан на рис. 92. Расходомер состоит из корпусной трубы 1, подвижного 2 и неподвижного 3 дисков на оси кронштейна 4 и вторичного преобразователя 5, имеющего выход на измерительный прибор 6. Диски 2, 3 снабжены окнами 7 радиально-концентрического расположения. На обеих проекциях рисунка

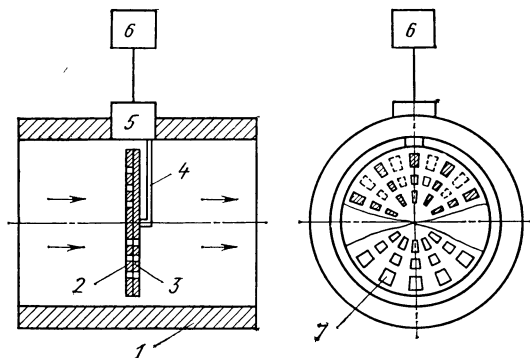


Рис. 92. Расходомер с линейной характеристикой

нижняя половина дисков изображена с совмещенными окнами, а верхняя половина — в положении полного перекрытия проходного сечения дисков.

В положении дисков, обеспечивающем полное перекрытие окон, работа предложенного расходомера аналогична работе известного: входной ламинарный поток малой интенсивности проходит через кольцевую щель между плотно прилегающими дисками и стенками корпусной трубы, в результате чего ламинарное движение потока частично превращается в турбулентное. При этом повышается степень постоянства коэффициента расхода. Расходомер обладает высокой чувствительностью из-за большого лобового сопротивления и приемлемой линейностью преобразования вследствие умеренной турбулентности измеряемого потока. Плотное взаимное прилегание дисков осуществляется силами магнитного сцепления.

С ростом интенсивности входного потока подвижный диск поворачивается вокруг оси кронштейна, занимая в пределе положение, изображенное на рис. 92 для нижней половины дисков. Вследствие того, что диски профилированы одинаково, их окна расположены радиально-концентрично. Их ширина равна ширине промежутков первого концентрического ряда. Окна взаимно совпадают, образуя многочисленные сквозные отверстия в дисках. В результате входной поток возросшей интенсивности дробится, протекая через кольцевую щель и проходные сечения окон. Степень турбулентности его снижается, линейность преобразования сохраняется в прежних пределах. Из-за уменьшения лобового сечения дисков уменьшается их аэродинамическое сопротивление, и вторичный преобразователь воспринимает приблизительно такой же сигнал, как и

раньше. Тем самым расширяется диапазон измерений расходомера.

Вторичный преобразователь выполняют чувствительным либо к перепаду давления, возникающему в сечениях корпусной трубы до и после дисков, либо к давлению напора, передающемуся через кронштейн, а также к степени отклонения системы (диски — кронштейн), которую в этом случае делают упругой. Соответствующим подбирают и тип измерительного прибора. Во всех случаях смещение подвижного диска относительно неподвижного равносильно переходу расходомера на новый предел измерения.

Вследствие намагниченности дисков их взаимное плотное прилегание обеспечивается автоматически и исключает ответвление измеряемого потока между торцевыми поверхностями. Одновременно отпадает необходимость специального крепления подвижного диска на оси кронштейна. Поворот диска осуществляется автоматически под действием самого потока, поскольку диск снабжен специальными насечками по типу аэродинамических закрылков.

Таким образом, исполнение воспринимающего напорное давление потока элемента расходомера в виде двух тонких, плотно прилегающих друг к другу и профилированных одинаковыми окнами дисков, один из которых посажен на оси подвижно, существенно расширяет функциональные возможности расходомера. Поскольку диски выполнены из намагниченного материала, упрощается система крепления подвижного диска и его прижатия к неподвижному. Эффект полного перекрытия проходного сечения дисков достигнут тем, что их окна имеют радиально-концентрическое расположение, причем ширина окон ближайшего к оси вращения концентрического ряда равна ширине межоконного промежутка.

Расходомер может найти применение при измерениях потоков различных жидкостных и газообразных сред, например, в прикладной гидродинамике.

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измерение температуры является одной из основных проблем измерительной техники. Теории и расчету устройств для измерения температуры посвящено значительное число работ [24, 34, 46, 58, 65, 88, 96, 108, 109]. Ниже даются характеристики нескольких датчиков температуры, разработанных в ОКБ БИМЖ ЛЭТИ.

1. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПРОВОЛОЧНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Датчик температуры (рис. 93) предназначен для измерения температуры при океанологических глубоководных исследованиях [65]. Чувствительный элемент 1 (платиновая проволока диаметром 0,03 мм намотана бифилярно на стеклянный пруток и спечена с

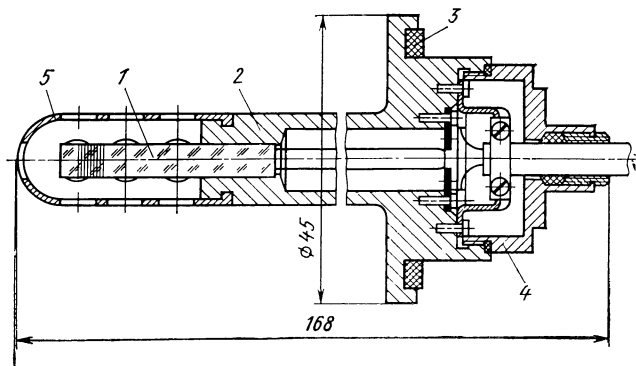


Рис. 93. Датчик температуры:

1 — платиновый чувствительный элемент; 2 — корпус; 3 — прокладка; 4 — стакан; 5 — защитный колпак

ним) спечен с корпусом 2 на стеклянной эмали с низкой температурой плавления ($\sim 350^\circ\text{C}$). Корпус датчика выполнен из сплава H29518 (ковар) с никелированием с подслоем меди.

Характеристика датчика

Постоянная времени τ в воде, с	0,5
Сопротивление чувствительного элемента при 0°C , Ом	100
Нелинейность в интервале температур от -2 до $+30^\circ \text{C}$, %, не более	1
Допустимое рабочее наружное давление морской воды, МПа	10
Чувствительность по напряжению на выходе усилительного устройства, В/ $^\circ \text{C}$	0,15
Масса, кг	0,4

2. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ

Датчики температуры с чувствительными элементами из монокристаллических дендритных лент германия и кремния имеют высокие метрологические характеристики и отличаются технологичностью изготовления.

На рис. 94 показана конструкция миниатюрного полупроводникового датчика температуры с чувствительным элементом из дендритной ленты германия (гедистор) p -типа с $\rho = 0,9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, с номинальным сопротивлением при температуре 20°C $R_{20} = 210 \text{ Ом}$. Чувствительный элемент 1 размером $0,25 \times 0,5 \times 3 \text{ мм}$ размещен в стеклянном плоскопараллельном капилляре 2, изготовленном методом растягивания стекла в подобии, предложенном лауреатом Ленинской премии проф. Б. В. Перфильевым. Один конец капилляра оплавлен. Внутренняя полость капилляра заполнена кварцевой пудрой. Открытый торец капилляра в месте выхода токоподвода 3 залит эпоксидным компаундом холодного отверждения. Внешний вид датчика показан на рис. 95.

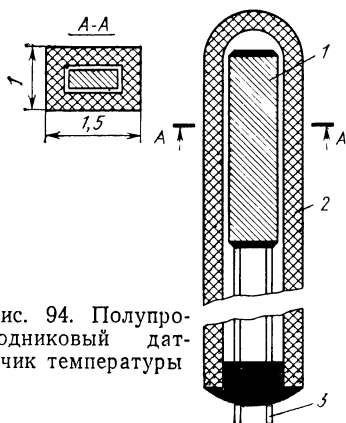


Рис. 94. Полупроводниковый датчик температуры

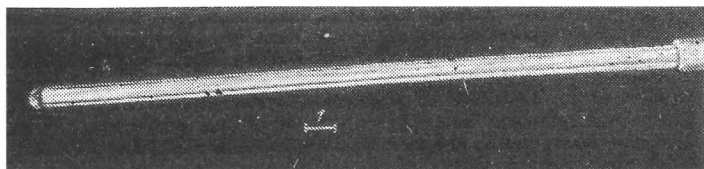


Рис. 95. Внешний вид полупроводникового датчика температуры

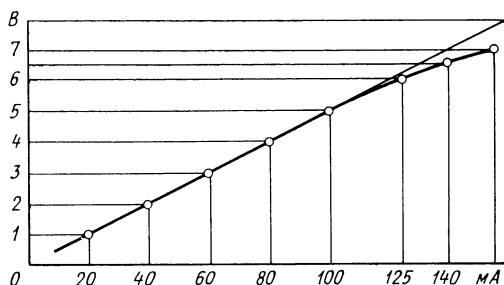


Рис. 96. Вольт-амперная характеристика датчика при температуре 20°C

Использование плоскопараллельных стеклянных капилляров позволяет придавать датчику различные геометрические формы, а также изменять его габаритные размеры в широких пределах. При измерении температуры датчик может быть включен в обычную мостовую схему. Величина тока в чувствительном элементе не должна превышать допустимую величину, определяемую по вольт-амперной характеристике (рис. 96). Постоянная времени датчика в воздухе и температурный коэффициент сопротивления соответственно равны $\tau=15$ с, $\text{ТКС}=5 \cdot 10^{-3}$ 1/°C. Пределы рабочих температур от -196 до +100°C.

3. ГАЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ (МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КЛЕИ) КАК НОВЫЙ КОНСТРУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Специфичность требований, предъявляемых к современным температурным датчикам (агрессивность рабочих сред, малогабаритность, высокая чувствительность и надежность, малая инерционность и т. д.), создает значительные трудности при разработке датчиков, в которых в качестве чувствительных элементов используются полупроводниковые термисторы, заключенные в стеклянную оболочку. Возникла конструкторская задача создания нового способа соединения стеклянного термистора с теплоприемником датчика.

Способ соединения стеклянного термистора с теплоприемником датчика должен удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Обеспечивать высокую теплопроводность и малую теплоемкость между теплоприемником и термистором.

2. Должен обладать высокими и стабильными адгезионными свойствами.

3. Рабочая температура соединения в процессе его производства не должна превышать 30—40°C.

4. Должен обеспечивать механически прочное, герметичное, вакуум-плотное соединение.

5. Должен быть технологичным и недорогостоящим.

Всем этим требованиям с наибольшей полнотой отвечает пока еще мало известный способ соединения с использованием металли-

ческих клеев (мекладинов или галлиевых припоев), исключая необходимость использования нагрева или требующий незначительного нагрева (менее 100°C).

Получаемые по этому способу соединения обеспечивают высокую электропроводность и теплопроводность, а также могут выдерживать температурные воздействия до 700—800°C [61]. К наиболее важным и перспективным особенностям галлиевых припоев, которые определяют области их использования, относятся:

а) создание прочных электропроводных соединений при нормальных температурах без применения флюсов;

б) прочное соединение деталей из разнородных материалов (металл—керамика, металл—стекло, металл—полимер и др.);

в) создание тугоплавких материалов и деталей при нормальной температуре.

Галлиевые припои представляют собой пасты, приготовленные при комнатной температуре смешиванием расплавленного галлия ($t_{пл} = 29,9^\circ\text{C}$) или низкоплавкого галлиевого сплава с порошками меди, серебра, никеля или другого металла, образующего с галлием бинарную диаграмму состояния с широкой областью растворимости и рядом интерметаллических соединений.

Паста сохраняется некоторое время при комнатной температуре в твердо-жидком состоянии, а затем затвердевает, образуя сплав, температура плавления которого значительно выше температуры плавления галлия. Пасту наносят на паяемые поверхности, которые затем соединяют без приложения нагрузки; после затвердевания пасты соединение приобретает хорошие электрические и механические свойства и может работать в широком диапазоне температур ($-269 \div +800^\circ\text{C}$ и выше). Жидкий галлий является одним из самых поверхностно-активных металлов. Он хорошо смачивает металлические и неметаллические материалы, в связи с этим пайка галлиевыми припоями осуществляется без применения флюсов. Активность галлия при соприкосновении с твердыми металлами может вызвать значительное изменение их механических свойств.

Технологические свойства припоев: консистенция пасты после приготовления, время сохранения пастообразного состояния в процессе пайки и время затвердения зависят от процентного содержания компонентов припоя, свойств порошка и режимов термообработки. Свойства паяного шва в значительной степени определяются состоянием поверхности и физическими характеристиками материала соединяемых поверхностей. Для пайки при температуре окружающего воздуха менее 25°C целесообразно вместо чистого галлия использовать его сплавы с оловом, цинком, индием, кадмием и серебром, что исключает кристаллизацию галлия в процессе пайки. При комнатной температуре и при нагреве до 70°C образуется первая тугоплавкая фаза галлий—металл, находящаяся в равновесии с галлием или раствором на его основе. Ускорение процесса гомогенизации может быть достигнуто при использовании минимально тонких порошков и максимально допустимой температуры обработки.

Разработанные Гиредметом галлиевые припои, содержащие в качестве наполнителя медный порошок, могут быть применены для соединения при комнатной температуре следующих основных материалов:

1) ковара с коваром, керамикой, стеклом, германием, кремнием, кварцем, сапфиром;

- 2) нержавеющей стали со сталью, кварцем, кремнием, арсенидом, фосфидом и антимонидом галлия и индия;
- 3) латуни с латунью, ферритами, пьезокерамикой, сапфиром, сталью, фарфором, ситаллом, германием и кремнием;
- 4) стекла со стеклом, кварцем, кремнием, германием и бериллием;
- 5) никеля с никелем, карбидом кремния, палладием и манганином;
- 6) стали 25 с бронзографитами.

Все эти соединения, выполненные с использованием галлиевых припоев, надежно работают до температуры 100°C.

Указанные соединения механически прочны, вибропрочны, электропроводны и коррозионно-стойки при климатических испытаниях.

Технология соединений с особыми свойствами (вакуумная плотность, стойкость при высоких температурах с резким ее изменением и т. д.) должна разрабатываться специально в каждом конкретном случае, так как свойства галлиевых припоев и сплавов, а также получаемых с их помощью соединений определяются многими факторами (состав жидкого сплава и припоя, термообработка, материал соединяемых деталей, их форма, размер и т. д.). Для соединений, работающих при температуре до 100°C, содержание меди в припоях может выбираться в широких пределах, но не должно быть меньше 32% (по весу). Соединения с рабочей температурой 100—250°C должны иметь в припое содержание меди не более 34%, для рабочих температур, превышающих 250°C, содержание меди в припоях должно превышать 55%, иначе в припоях будет появляться жидкая фаза. Во всех случаях режим термообработки должен обеспечивать полную гомогенизацию сплавов.

Галлий и его сплавы с оловом, индием, кадмием, серебром и никелем не токсичны и не вызывают интоксикации даже при длительном поступлении в организм, а также не раздражают кожный покров и слизистые поверхности (носоглотка, глаза и т. д.).

Технология пайки

1. С сопрягаемых поверхностей удаляют окисную пленку (обработка нождачной бумагой, травление, применение ультразвука и т. д.).

2. Выдерживают шероховатость поверхностей в пределах $\nabla 4$ — $\nabla 6$.

3. Поверхности, имеющие гальванические покрытия, механически не обрабатывают, а только обезжиривают.

4. Все поверхности, подлежащие пайке, обезжиривают ватным тампоном, смоченным в спирте, и просушивают на воздухе.

5. Соединяемые поверхности натирают небольшим количеством пасты припоя при помощи шпателя или смачивают жидким галлием с помощью ультразвука.

6. На поверхности наносят равномерный слой припоя (0,2—0,3 мм) и соединяют детали.

7. При соединениях в пазах и отверстиях последние набивают припоем до полного удаления пустот и зазоров.

8. Детали фиксируют в необходимом положении при помощи приспособлений и проводят термообработку для отверждения припоя по режимам, указанным в табл. 12.

Рассмотренный способ соединения в настоящее время широко используют при изготовлении биологических температурных датчиков различных назначений.

В качестве примера на рис. 97 изображен датчик для измерения температуры в полости пищевода. Термистор 1 вжимают в ме-

Таблица 12

**Физико-механические свойства и режимы термообработки
припоев**

Физико-механические свойства и режимы термообработки припоев	Припой ПГМ-65 (Cu 36— 34%, Ga 64— 66%)	Припой ПГН-54 (Ni 47—45%, Ga 53—55%)
Предел прочности при растяжении после отверждения, МПа:		
через сутки	22	20
через месяц	33	29
Удельный вес, Н/см ³	0,055	0,0585
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м	0,36	0,19
Предел прочности на срез, МПа	200—240	220—260
Вязкость (время протекания столбика пасты высотой 5 мм через отверстие диаметром 1,5 мм при нагрузке 0,5 кг), с	30	50
Температура отверждения, °С	18—20	18—20
Время отверждения при температуре $t=20-22^{\circ}\text{C}$, мин	25—40	25—40
Температура размягчения затвердевшего припоя через месяц, °С, не менее	150	180
Температура размягчения после термиче- ской обработки по режимам, °С, не менее:		
при 70° С в течение 3 ч	100	150
при 100° С в течение 3 ч	280	310
при 150° С в течение 3 ч	350	400
Твердость (по Супер—Роквеллу) спустя 2—3 ч после затверждения, не менее . .	38	40

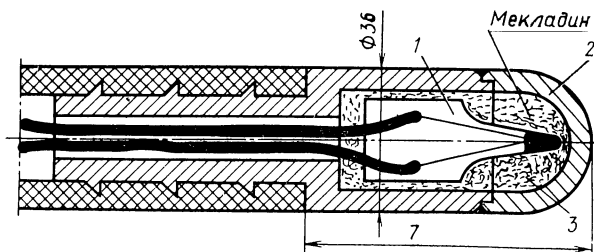


Рис. 97. Датчик для измерения температуры в полости
пищевода

таллический теплоприемник 2 с пастообразным металлическим клеем (припоем) 3 при нормальной температуре. Через несколько часов металлический клей отверждается, обеспечивая механически прочное соединение с высокой теплопроводностью.

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

В последние годы значительное внимание обращают на исследование динамических характеристик и динамических ошибок приборов, измеряющих температуру. Этим вопросам посвящены фундаментальные работы [21, 24, 95].

Анализ этих вопросов в некоторой степени упрощается тем, что отдельные элементы (соединительные звенья) указательной системы и шкалы приборов для измерения температуры имеют динамические характеристики, сравнимые с характеристиками датчиков (преобразователей температуры). Из этого следует, что основная проблема в создании систем для измерения температуры состоит в разработке температурных датчиков, которые могли бы следить за изменениями входной температуры с достаточной скоростью. Дать точное теоретическое предсказание динамических характеристик температурных датчиков, несмотря на известность формальных выражений для основных физических процессов, крайне сложно и в большинстве случаев в настоящее время не представляется возможным. Практически динамические характеристики реальных датчиков определяются экспериментальными методами. Ниже приводятся некоторые обобщения по данному вопросу.

Датчик выполняет функцию передачи измеряемой температуры от материала или потока к его чувствительному элементу, от которого электрический сигнал передается соединительному звену системы. Если существует точное равенство между температурой датчика и входной температурой, то датчик имеет идеальные динамические характеристики. Таким образом, идеальная характеристика датчика равна единице. В реальных конструкциях это не достигается, так как материал датчика всегда имеет конечную теплоемкость и должна всегда существовать разность температур для создания теплового потока в датчике или из датчика. В связи с этим входная температура является средней температурой по некоторой массе материала. Одна из основных задач конструирования датчика состоит в уменьшении влияния температурных градиентов. Отклонения реальной характеристики датчика от идеальной учитываются соответствующими статической и динамической градуировками.

Если при физических изменениях в процессе измерения количество тепла практически остается постоянным, то увеличение тепла в датчике изменяет его температуру в соответствии с известным выражением

$$\frac{dQ}{dt} = \rho_d V_d C_d \frac{dT_d}{dt} \quad (106)$$

где $\frac{dQ}{dt}$ — тепловой поток в датчике; ρ_d — средняя плотность датчика; V_d — объем датчика; C_d — средняя теплоемкость датчика; T_d — температура датчика.

Тепловой поток в теплоприемнике датчика состоит из трех частей: тепловой поток в датчике=внешний конвекционный тепловой поток через жидкостную пленку на поверхности датчика+внешний тепловой поток за счет радиационного обмена между поверхностью датчика и окружающей средой+внешний тепловой поток через конструктивные элементы крепления датчика; таким образом,

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_K}{dt} + \frac{dQ_P}{dt} + \frac{dQ_{Эл}}{dt},$$

где

$$1. \frac{dQ_K}{dt} = \lambda s (T_{вх} - T_d),$$

здесь λ — коэффициент теплопроводности пленки на датчике при тепловом потоке. Величина коэффициента λ определяется многими факторами: вязкостью жидкости, сжимаемостью жидкости, размерами датчика, ориентацией датчика относительно скорости жидкости и т. д.; как правило, величину λ определяют экспериментально; s — площадь приемника.

$$2. \frac{dQ_P}{dt} = spc (T_{вх}^4 - T_d^4),$$

здесь p — эмиссионная способность поверхности датчика, c — коэффициент излучения черного тела.

Если $T_{вх}$ отличается от T_d не более чем на 20%, то, полагая $T_{вх} \approx T_d$ с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$, можно привести уравнение к виду

$$\frac{dQ_P}{dt} = \alpha_d s (T_{вх} - T_d), \quad (107)$$

α_d — эквивалентный коэффициент радиационного теплового потока датчика, равный $4pcT_d^3$.

3. $\frac{dQ_{Эл}}{dt}$ — тепловой поток в датчике через его конструктивные элементы крепления.

Для случая постоянного сечения элемента крепления можно записать

$$\frac{dQ_{Эл}}{dt} = \frac{\lambda'_K s_K}{L_K} (T_{вх} - T_d). \quad (108)$$

Здесь λ'_K — коэффициент теплопроводности элемента крепления, а s_K и L_K — его площадь сечения и длина соответственно.

Соединив уравнения пунктов 1, 2, 3, получим дифференциальное уравнение датчика температуры следующего вида:

$$\rho_d v_d C_d \frac{dT_d}{dt} = (\lambda s + \alpha_d s + \lambda'_K s_K) (T_{вх} - T_d)$$

или, обозначив

$$\tau_d = \frac{\rho_d c_d s_d}{\lambda_s + \alpha_{ds} + \lambda_{ks} s_k},$$

где τ_d — термометрическая постоянная времени, окончательно получим

$$\tau_d \frac{dT_d}{dt} + T_d = T_{вх}. \quad (109)$$

Ранее отмечалось, что отдельные элементы системы измерения температуры имеют динамические характеристики, сравнимые с характеристиками датчиков. Это означает, что результирующее дифференциальное уравнение прибора для измерения температуры имеет тот же вид, что и уравнение для датчика, т. е.

$$\tau_p \frac{dT_p}{dt} + T_p = T_{вх}, \quad (110)$$

где индекс p означает «прибор», например T_p — отсчет температуры по шкале прибора.

Это уравнение является типичным дифференциальным уравнением первого порядка с независимой переменной нулевого порядка. Если считать, что величина τ_p постоянна, то для теоретического определения показаний прибора при типичных законах изменения входной температуры (единичная функция, монотонно изменяющаяся функция, параболическая и синусная функция) удобно использовать безразмерные характеристические кривые, данные в [21].

На величину постоянной τ_d влияет множество факторов.

Для тонкого физического эксперимента необходимы датчики температуры с чрезвычайно малой постоянной времени (0,3 с и менее). Конструировать и разрабатывать такие датчики очень сложно. Ниже даны основные рекомендации по разработке датчиков температуры с минимальной постоянной времени.

Конструктивный параметр $\frac{V_d}{s}$ как для чувствительного элемента, так и для теплоприемника должен быть минимальным. В этом смысле предпочтительны полупроводниковые пленочные и монокристаллические чувствительные элементы, так же как и металлические чувствительные элементы из микропровода и пленок. Материал теплопроводника и чувствительного элемента должен иметь минимальную плотность и теплоемкость при максимальной теплопроводности (например, алюминиевый коррозионно-стойкий, прочный сплав В-95).

В качестве конструктивного элемента для соединения теплоприемника с чувствительным элементом целесообразно использовать галлиевые сплавы или серебряные мекладины, отличающиеся технологичностью применения.

Расчет чувствительности и частотных характеристик полупроводниковых датчиков давления с плоскими мембранами

Расчет дан для трех типов плоских мембран:

- а) плоской мембраны, жестко заземленной по контуру в корпусе датчика с двух сторон;
- б) плоской мембраны, приваренной к корпусу рельефной конденсаторной сваркой;
- в) колпачковой плоской мембраны с цилиндрической вставкой.

Независимо от способа заделки и типа плоские тонкие металлические, кварцевые и сапфировые мембраны имеют линейную зависимость напряжений от действующего распределенного давления при прогибе их центров, не превышающем $\frac{1}{3}$ толщины. При этом нелинейность характеристик упругих плоских мембран не превышает 5—6%.

Если по условиям эксплуатации допустимые нелинейность и гистерезис датчиков должны быть не более 1,5%, то необходимо обеспечить условие — прогиб центра мембраны не должен превышать $\frac{1}{10}$ ее толщины. Под плоской мембраной понимают мембрану, в которой $\frac{R}{h} \geq 25$.

Конструктивные схемы мембран и предпочтительные способы расположения тензорезисторов показаны на рис. 1П.

1. Расчет чувствительности датчиков давления с жестко заделанными мембранами (рис. 1П, а) 1.1. Прогиб центра мембраны при жесткой заделке и отсутствии первоначального натяга определяют по формуле [17]

$$\frac{PR^4}{Eh^4} \approx \frac{16}{3(1-\mu^2)} \left(\frac{\Delta}{h} \right),$$

где Δ — прогиб центра мембраны, м; p — давление, Н/м²; R — эффективный радиус мембраны, м; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль продольной упругости, Н/м²; h — толщина, м.

1.2. Радиальные и тангенциальные напряжения и относительные деформации в различных точках мембраны определяют по формулам [3]

$$\sigma_r = \frac{3p}{8h^2} [R^2 (1 + \mu) - r^2 (3 + \mu)];$$

$$\sigma_t = \frac{3p}{8h^2} [R^2 (1 + \mu) - r^2 (1 + 3\mu)];$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu\sigma_t); \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu\sigma_r).$$

1.3. Суммарные напряжения вычисляют по теории энергии формоизменения для плоского напряженного состояния:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_r \sigma_t},$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq \sigma_{\text{Доп.}}$$

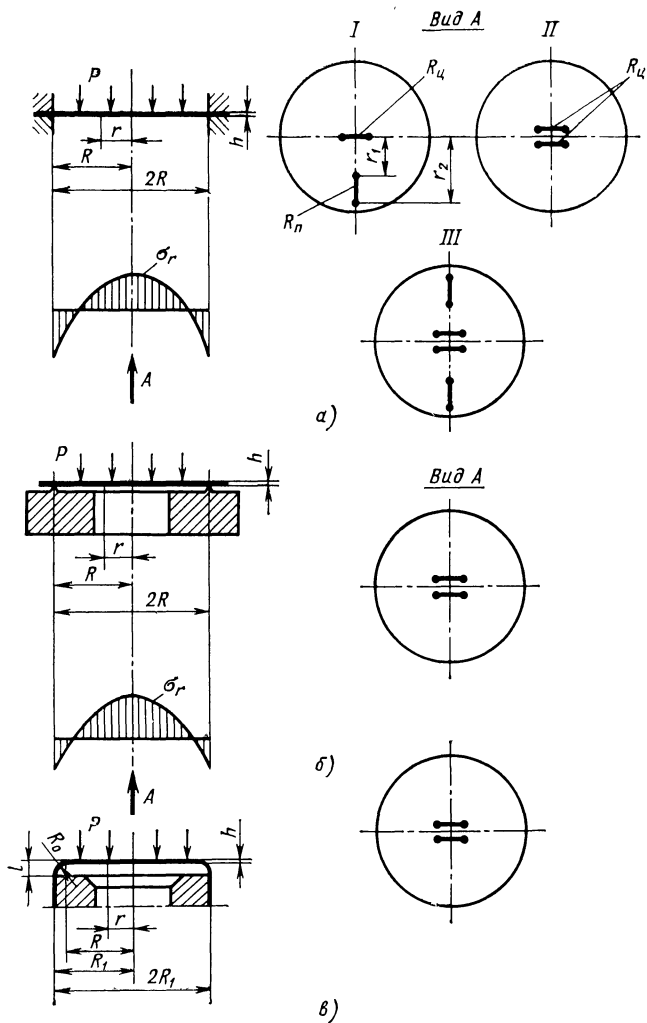


Рис. 1П.

Допустимые напряжения $\sigma_{\text{доп}} \approx \frac{\sigma_{\text{в}}}{2}$, модули продольной

упругости и коэффициенты Пуассона выбирают:

сплав 12Х18Н9Т — $\sigma_{\text{в}}=600$ МПа; $E=1,9 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,3$;

сплав БНТ — $\sigma_{\text{в}}=1000$ МПа; $E=1,3 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,19$;

сплав 36НХТЮ — $\sigma_{\text{в}}=1200$ МПа; $E=2,0 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,3$;

сплав 55ВТЮ — $\sigma_{\text{в}}=1200$ МПа; $E=1,1 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,25$;

кварц (плавленый) — $\sigma_{\text{в}}=100$ МПа; $E=0,8 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,2$;

сапфир — $\sigma_{\text{в}}=200$ МПа; $E=4,0 \cdot 10^2$ МПа; $\mu=0,25$.

1.4. Средняя относительная деформация мембраны на участке приклейки тензорезисторов:

а) центрального

$$\epsilon'_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{д}}}{l_{\text{д}}}; \quad \Delta l_{\text{д}} = 2 \int_0^{\frac{l_{\text{д}}}{2}} \epsilon_r dr,$$

где $l_{\text{д}}$ — длина датчика (база), мм;

б) периферийного

$$\epsilon''_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{д}}}{l_{\text{д}}}; \quad \Delta l_{\text{д}} = \int_{r_1}^{r_2} \epsilon_r dr;$$

$$\Delta l_{\text{д}} = \frac{3p(1-\mu^2)}{8h^2E} (r_2 - r_1) [R^2 - r_2^2 - r_2 r_1 - r_1^2].$$

1.5. Изменения сопротивлений тензорезисторов определяют по формулам:

а) центрального

$$(\Delta R_y)_p = K (R_0)_p \epsilon'_{\text{ср}} S_p;$$

$$(\Delta R_y)_n = K (R_0)_n \epsilon'_{\text{ср}} S_n,$$

где K — коэффициент снижения передачи деформации тензорезистору за счет слоя клея, определяется типом клея и качеством клеевого соединения, для клеев БФ-2 и ВЛ-931 $K=0,85 \div 0,95$; индексы «р» и «п» определяют тип проводимости тензорезисторов,

б) периферийного

$$\Delta R_n = K R_0 \epsilon''_{\text{ср}} S.$$

1.6. Суммарное изменение сопротивления определяется:

для схемы I (см. рис. 1П)

$$\Delta R' = \Delta R_{\text{ц}} + \Delta R_n;$$

для схемы II

$$\Delta R'' = (\Delta R_{\text{ц}})_p + (\Delta R_{\text{ц}})_n;$$

для схемы III

$$\Delta R''' = 2\Delta R'.$$

1.7 Выходное напряжение при включении тензорезисторов по мостовой схеме равно:

а) для схем с двумя активными тензорезисторами

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{\frac{\Delta R_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} + \frac{\Delta R_n}{R_n}}{2 \left(2 + \frac{\Delta R_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} - \frac{\Delta R_n}{R_n} \right)};$$

б) для схем с четырьмя активными тензорезисторами

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{\frac{\Delta R_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} + \frac{\Delta R_n}{R_n}}{2 + \frac{\Delta R_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} - \frac{\Delta R_n}{R_n}}.$$

Напряжение питания выбирают из условия $U_{\text{пит}} \leq I \cdot 2R_0$, где I — допустимый ток, протекающий через тензорезистор. Для кремниевых тензорезисторов типа Ю-8 допустимый ток $I=10$ мА. Допустимое относительное удлинение для этих тензорезисторов составляет $\epsilon_{\text{доп}} \leq 10^{-3}$.

2. Расчет чувствительности датчиков давления с плоскими мембранами, приваренными к корпусу рельефной конденсаторной сваркой (рис. 1П, б). Ввиду поворота сечений мембраны в месте рельефной сварки [52] использование активных периферийных тензорезисторов в данном случае не является целесообразным. Здесь используются два центральных тензорезистора p - и n -типов проводимости. Эти мембраны отличаются несколько большей податливостью, чем мембраны с жесткой заделкой с двух сторон: повышение податливости учитывается экспериментальным коэффициентом K' . Тогда

$$\Delta = K' \Delta_{\text{ж}}; \quad \epsilon_{\text{ср}} = K' (\epsilon_{\text{ср}})_{\text{ж}},$$

где Δ — прогиб центра мембраны, соединенной с корпусом рельефной сваркой; $\Delta_{\text{ж}}$ — прогиб центра жестко заделанной мембраны; $\epsilon_{\text{ср}}$ — относительное удлинение тензорезистора, наклеенного на мембрану с рельефной сваркой; $(\epsilon_{\text{ср}})_{\text{ж}}$ — относительное удлинение тензорезистора, наклеенного на жестко заделанную плоскую мембрану.

Величина коэффициента K' для мембран диаметром 9—12 мм и толщиной 0,07—0,2 мм составляет $K'=1,05 \div 1,1$. В остальном расчет не отличается от приведенного в п. 1 расчета чувствительности датчиков с жестко заделанными мембранами.

3. Расчет чувствительности датчиков давления с колпачковыми мембранами (рис. 1П, в). Колпачковая мембрана состоит из плоской центральной части радиуса R и цилиндрического буртика, сопряженных между собой по радиусу R_0 .

При соизмеримости размеров высоты буртика l и радиуса R_0 податливость участка закругления R_0 вызывает повышение чувствительности мембраны по прогибу ее центра Δ и по σ_r . Чувствительность колпачковых мембран превышает более чем в 2 раза чувствительность плоских мембран, жестко заделанных по контуру. Для колпачковых мембран имеем зависимость

$$\sigma_r = \mp \left[\frac{Eh(1+\mu)}{2(1-\mu^2)} \frac{3}{4} \frac{pR^2}{Eh^2} \times \right. \\ \times \frac{\frac{R}{h}(1-\mu^2) + \frac{1}{3} \beta^3 R^2 h (3+\mu) + 8 \frac{R_0^2}{Rh}}{R - \frac{1}{3} \frac{\beta^3 R^2 h^2}{1-\mu}} - \\ \left. - \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{pr^2}{16D} (3+\mu) \right],$$

где D — цилиндрическая жесткость,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)};$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{Rh}} \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}.$$

В центре мембраны при $r=0$ имеем

$$\sigma_r \Big|_{r=0} = \mp \frac{3}{8} \frac{pR^2}{h^2} \times \\ \times \frac{R(1+\mu) + \frac{1}{3} \beta^3 R^2 h^2 \frac{(3+\mu)}{(1-\mu)} + 8 \frac{R_0^2}{R(1-\mu)}}{R - \frac{1}{3} \frac{\beta^3 R^2 h^2}{1-\mu}}.$$

В датчике давления с колпачковыми мембранами используются два центральных тензорезистора p - и n -типов. Средняя относительная деформация мембраны на участке приклейки центральных тензорезисторов определяется зависимостью

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 2 \int_0^{l_d/2} \varepsilon_r dr = Al_d - B \frac{l_d^3}{12},$$

где

$$A = \frac{h(1+\mu)}{E(1-\mu^2)} \frac{3}{4} \frac{pR^2}{h^2} \times \\ \times \frac{\frac{R}{h}(1-\mu^2) + \frac{1}{3} \beta^3 R^2 h (3+\mu) + 8 \frac{R_0^2}{Rh}}{R - \frac{1}{3} \frac{\beta^3 R^2 h^2}{1-\mu}}; \\ B = \frac{h}{(1-\mu^2)} \frac{p}{16D} (3+\mu).$$

Дальнейший расчет может быть проведен по пункту 1.

4. Расчет частотных характеристик датчиков давления. 4.1. Собственную частоту колебаний (основной тон) жестко заделанной по контуру плоской мембраны датчика в воздушной среде определяют по формуле

$$f_0 = 1,57 \sqrt{\frac{Eh^3}{12R^4m_0(1-\mu^2)}}, \text{ Гц},$$

где E — модуль продольной упругости материала мембраны, Н/м²; h — толщина мембраны, м; R — эффективный радиус мембраны, м; m_0 — масса единицы площади мембраны, кг/м²; μ — коэффициент Пуассона материала мембраны.

4.2. Собственную частоту колебаний (основной тон) плоской мембраны, соединенной с корпусом рельефной конденсаторной сваркой, определяют по формуле, полученной экспериментальным путем:

$$f_0 \approx 1,55 \sqrt{\frac{Eh^3}{12R^4m_0(1-\mu^2)}}, \text{ Гц}.$$

4.3. Частотные характеристики датчика, мембрана которого соприкасается с жидкостью, приведены ниже.

Одной из основных характеристик, определяющих частотные свойства датчика, заполненного жидкостью, является модуль объемной упругости E_V :

$$E_V = \frac{p}{\Delta V} [\text{Н} \cdot \text{м}^{-5}],$$

где E_V — модуль объемной упругости, Н·м⁻⁵; p — распределенное давление, Па; ΔV — увеличение объема рабочей камеры датчика при давлении $p_{\text{ном}}$, м³.

Величину E_V можно определить как расчетным путем, так и экспериментально. Приращение объема ΔV для датчиков с плоскими мембранами, жестко заделанными в корпус, определяют по формуле [3]

$$\Delta V = \pi R^2 \Delta \frac{z+1}{2(z+3)},$$

где ΔV — приращение объема, мм³; R — эффективный радиус мембраны, мм; Δ — прогиб центра мембраны, мм; z — параметр, $z = f\left(\frac{h}{\Delta}\right)$, при $\Delta < h$, где h — толщина мембраны, $z=3$ (см. [3]).

Для выносных полупроводниковых артериальных датчиков разработки ОКБ БИМК имеем $p=300$ мм рт. ст., $\Delta=0,006$ мм; тогда

$$\Delta V = \pi \cdot 4,5^2 \cdot 0,006 \frac{3+1}{2(3+3)}; \quad \Delta V = 0,126 \text{ мм}^3;$$

$$E_V = \frac{400,000}{0,000126};$$

$$E_V = 3,2 \cdot 10^{14} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-5}.$$

При экспериментальном определении E_V используют стеклянный капиллярный насадок, гидравлически связанный с рабочей полостью датчика. Капилляр и рабочая полость датчика заполняют жидкостью вакуумным путем (например, подкрашенным спиртом). Смещение мениска жидкости в капилляре насадка при подаче номинального давления (для артериальных датчиков $p_{ном}=300$ мм рт. ст., для венозных $p_{ном}=300$ мм вод. ст.) однозначно определяет величину ΔV и E_V .

Тогда

$$\Delta V = \pi r^2 L,$$

где r — внутренний радиус капилляра (обычно $r=0,1 \div 0,15$ мм); L — величина смещения мениска, мм.

Экспериментальное определение E_V более точно, так как здесь учитывают также увеличение объема приемной камеры корпуса датчика при подаче давления.

4.4. Собственную частоту незатухающих колебаний датчика, заполненного жидкостью и снабженного абсолютно жесткими трубопроводами или катетерами, определяют по формуле

$$f_0' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R^2 E_V}{l \rho}}, \text{ Гц},$$

где R — внутренний радиус катетера, м; E_V — модуль объемной упругости, Н·м⁻²; l — длина катетера, м; ρ — плотность среды, кг/м³.

4.5. Собственная частота затухающих колебаний (динамическая частота) определяется формулой [21]

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R^2 E_V}{l \rho} - \left(\frac{4\eta}{R^2}\right)^2}, \text{ Гц},$$

где η — кинематическая вязкость среды, м²/с.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Методика расчета чувствительности полупроводниковых датчиков расхода

Высокая чувствительность и малые габаритные размеры полупроводниковых тензорезисторов позволяют разрабатывать и конструировать расходомеры жидкости и газа различных типов с высокими статическими и динамическими характеристиками. Ниже дается методика расчета чувствительности полупроводниковых датчиков расхода двух типов — с плоской упругой мембраной с центральным отверстием и с подвижным сетчатым диском.

1. Расчет чувствительности датчика расхода с плоской мембраной с центральным отверстием.

Схема датчика приведена на рис. 2П, 1.1. Интенсивность радиальных и тангенциальных моментов M_r и M_t определяется зависимостью

$$\begin{aligned}
M_r &= \frac{p}{16} \left\{ (1 - \mu^2) \frac{r_2^4 - r_1^4 - 4r_1^2 r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_1^2 (1 + \mu) + r_2^2 (1 - \mu)} \times \right. \\
&\times \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) + 4r_1^2 - \frac{r_1^4}{r^2} (1 - \mu) - r^2 (3 + \mu) + \\
&\quad \left. + 4r_1^2 (1 + \mu) \ln \frac{r}{r_1} \right\}; \\
M_t &= \frac{p}{16} \left\{ (1 - \mu^2) \frac{r_2^4 - r_1^4 - 4r_1^2 r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_1^2 (1 + \mu) + r_2^2 (1 - \mu)} \times \right. \\
&\times \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) + 4\mu r_1^2 + \frac{r_1^4}{r^2} (1 - \mu) - r^2 (3\mu + 1) + \\
&\quad \left. + 4r_1^2 (1 + \mu) \ln \frac{r}{r_1} \right\},
\end{aligned}$$

Уравнения радиальных и тангенциальных напряжений, возникающих в материале мембраны, имеют вид

$$\sigma_r = \frac{6M_r}{h^2}; \quad \sigma_t = \frac{6M_t}{h^2}.$$

1.2. Суммарное напряжение вычисляют по теории энергии формоизменения для плоского напряженного состояния:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_r \sigma_t},$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq \sigma_{\text{Доп.}}$$

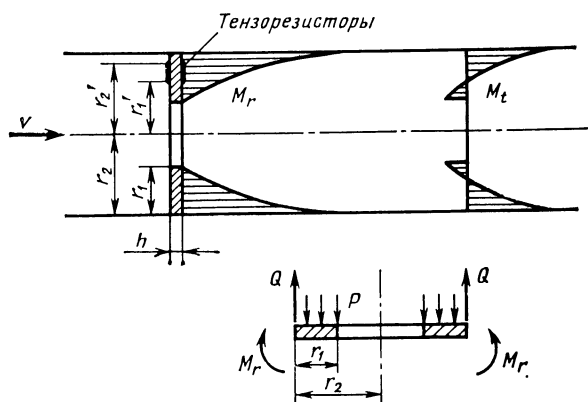


Рис. 2П.

1.3. С целью снижения температурной погрешности целесообразно использовать тензорезисторы одного типа проводимости, наклеиваемые с двух сторон мембраны у края заделки ее в корпус. Могут быть использованы как два, так и четыре активных тензорезистора (полный мост).

Средняя относительная деформация мембраны на участке приклейки тензорезисторов определяется выражениями:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{д}}}{l_{\text{д}}}; \quad \Delta l_{\text{д}} = \int_{r_1'}^{r_2'} \varepsilon_r dr = \int_{r_2^{-2}}^{r_2'} \varepsilon_r dr$$

(для тензорезисторов Ю-8 с базой 2 мм);

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} &= \frac{6p}{16Dh^2} \left[B \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) + 4r_1^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{r_1^4}{r^2} (1 - \mu) - r^2 (3 + \mu) + 4r_1^2 (1 + \mu) \ln \frac{r}{r_1} \right]; \\ B &= (1 - \mu^2) \frac{r_2^4 - r_1^4 - 4r_1^2 r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_1^2 (1 + \mu) + r_2^2 (1 - \mu)}; \\ \Delta l_{\text{д}} &= \frac{3p}{8h^2 E} \int_{r_1'}^{r_2'} \left\{ B - B \frac{r_1^2}{r^2} + 4r_1^2 - \frac{r_1^4}{r^2} (1 - \mu) - \right. \\ &\quad \left. - r^2 (3 + \mu) + 4r_1^2 (1 + \mu) \ln \frac{r}{r_1} \right\} dr = \frac{3p}{8h^2 E} \left\{ (B + 4r_1^2) \times \right. \\ &\quad \times (r_2' - r_1') + [Br_1^2 + (1 - \mu) r_1^4] \times \frac{r_1' - r_2'}{r_2' r_1'} - \frac{3 + \mu}{3} \times \\ &\quad \times [(r_2')^3 - (r_1')^3] + 4r_1^2 (1 + \mu) \left[r_2' \left(\ln \frac{r_2'}{r_1} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - r_1' \left(\ln \frac{r_1'}{r_1} - 1 \right) \right] \Bigg\}; \\ \Delta l_{\text{д}} &= \frac{3p}{8h^2 E} \left\{ 2 (B + 4r_1^2) - \frac{2}{r_2' (r_2' - 2)} \times \right. \\ &\quad \times [B + (1 - \mu) r_1^4] - \frac{2 (3 + \mu)}{3} [3 (r_2')^2 - \\ &\quad - 6r_2' + 4] + 4r_1^2 (1 + \mu) \left[r_2' \left(\ln \frac{r_2'}{r_1} - 1 \right) - \right. \end{aligned}$$

$$-(r_2' - 2) \left(\ln \frac{r_2'^2 - r_1'^2}{r_1'^2} - 1 \right) \Bigg] \Bigg\}.$$

Окончательно $\varepsilon_{\text{ср}} \frac{\Delta l_d}{2}$.

Величина p определяется выражением

$$p = \frac{\rho v^2}{2}, \text{ Н/м}^2,$$

где ρ — плотность среды, кг/м³; v — скорость потока, м/с.

Далее расчет может быть проведен по пункту 1.5 приложения 1.

2. Расчет чувствительности датчика расхода с подвижным сетчатым диском. 2.1. Для балки равного сопротивления имеем зависимость

$$\Delta = 6 \frac{l^3}{bh^3} \frac{P}{E} = \frac{l^2}{h} \frac{\sigma_H}{E} = \frac{l^2}{h} \varepsilon;$$

$$\varepsilon = \frac{6pl}{bh^2 E_j},$$

где ε — относительная деформация балки равного сопротивления.

Здесь $\varepsilon = \text{const}$ и место приклейки тензорезистора на балке не имеет принципиального значения.

2.2. Определение величины силы P , действующей на свободный конец балки (рис. 3П).

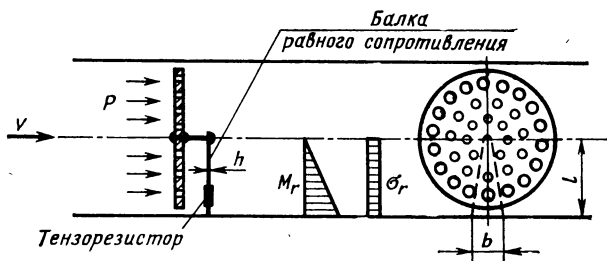


Рис. 3П.

Сила P является силой лобового сопротивления сетчатого диска в потоке. В общем случае имеем зависимость

$$P = C_x s \frac{\rho v^2}{2},$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления; s — площадь диска, м²; v — скорость потока, м/с; ρ — плотность среды потока, кг/м³.

Величину C_x определяют экспериментально. Для сетчатых дисков справочные данные по определению коэффициентов C_x нам неизвестны. Для дисков с отверстиями при диаметре диска 20—40 мм, толщине 0,1—0,3 мм и $\frac{s_{\text{отв}}}{s_{\text{перем}}} = 10$ (где $s_{\text{отв}}$ — суммарная площадь отверстий, $s_{\text{перем}}$ — суммарная площадь перемычек), величина C_x может быть приближенно принята равной $C_x = 0,35 \div 0,45$ (для скорости потока $v = 0,3 \div 1,5$ м/с).

2.3. Дальнейший расчет чувствительности может быть проведен по пункту 1,5 приложения I.

1. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. М., Машиностроение, 1965. 928 с.
2. Азизов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей. М., Энергия, 1975. 256 с.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М., Машгиз, 1962. 456 с.
4. Анохин Б. Г., Юнович А. Э., Лейстнер Л. Некоторые электрические свойства естественной поверхности германиевых дендритов. — В кн.: Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. Изд. Томского университета, 1964, с. 22—32.
5. Ахутин В. М., Осипович Л. А. Миниатюрный полупроводниковый датчик давления и температуры. — Приборы и системы управления, 1967, № 7, с. 50—51.
6. Прибор для прямого измерения давления крови / Ахутин В. М., Гампер И. Г., Осипович Л. А. и др. — Медицинская техника, 1971 № 6, с. 34—36.
7. Бабский Е. Б. Электроника и медицина. — В кн. Р. Стэси Электроника для биологов и медиков. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962, с. 9—70.
8. Балицкий С. П. Исследование и разработка системы измерения параметров вентиляционной функции легких. Автореферат на соискание степени канд. техн. наук СЗПИ, Л., 1973.
9. Балицкий С. П., Осипович Л. А. Напорный расходомер. Инф. листок ЛенЦНТИ, № 1129—75. Л., 1975. 4 с.
10. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., 1957. 726 с.
11. Берлин Г. С. Электронные приборы с механическими управляемыми электродами. М., Энергия, 1971. 160 с.
12. Браславский Д. А., Логунов С. С., Пельпор Д. С. Расчет и конструкция авиационных приборов. Оборонгиз, 1954.
13. Богданов Ю. М. Приборы точной механики. М., Машгиз, 1960. 415 с.
14. Борисова А. К., Белов Б. Г. Пружинный сплав на основе ниобия с высокой температурной стабильностью модуля упругости. — Металловедение и термообработка, 1966, № 6, с. 10—11.
15. Бухгольц В. П., Тисевич Э. Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. М., Энергия, 1972. 79 с.
16. Гампер И. Г. Библиография по полупроводниковым тензодатчикам. — Приборы и системы управления, 1966, № 9, с. 31—33.

17. Глаговский Б. А., Пивен И. Д. Электротензометры сопротивления. М., Энергия, 1964. 72 с.
18. Грузинцев Р. М., Линецкий А. И., Фиш М. Л. Линейный приемник измерения акустического и гидродинамического давления. Сб. «Приборостроение», вып. 2. Киев, Техника, 1966, с. 209—213.
19. Давиденков Н. П. Струнный метод измерения деформации. М., Гостехиздат, 1933. 60 с.
20. Дашевский М. Я. Выращивание лентоподобных дендритов полупроводниковых веществ. Обзор зарубежной техники М., Изд-во Комитета по координации научно-исследовательских работ, 1962. 32 с.
21. Дрейпер Ч. С., Маккей В., Лис С. Измерительные системы. М., ИЛ, 1960. 784 с.
22. Некоторые вопросы проектирования ультразвуковых датчиков. / Дрожжин А. И., Тютин А. А., Сафонов Ю. Д., Васильев В. А. — Медицинская техника, 1968, № 5, с. 8—13.
23. Заседателев С. М., Гук Г. Н. О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями. — Приборы и системы управления, 1971, № 11, с. 45—48.
24. Измерение температур в объектах новой техники / Под ред. А. Н. Гордова. М., Мир, 1965. 280 с.
25. Ильинская Л. С., Подмарьков А. Н. Полупроводниковые тензодатчики. М.—Л., Энергия, 1966. 118 с.
26. Ильин Г. С. Керамические пьезоэлементы. Л., ЛДНТП, 1963. 20 с.
27. Иориш Ю. И. Виброметрия. М., Машгиз, 1963. 771 с.
28. Иориш Ю. И. Ротационная чувствительность пьезодатчиков. Виброметрия. Сб. 2. Изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1965, с. 34—43.
29. Иориш Ю. И., Цеханский К. Р. Поперечная чувствительность нецентрированных вибродатчиков из пьезокерамики. — Измерительная техника, 1962, № 11, с. 26—27.
30. Кабатов Ю. Ф., Гришин А. Г. Вопросы проектирования мембранных датчиков с консольным тензопреобразователем. — Медицинская техника, 1969, № 4, с. 13—18.
31. Кобаяси М. Измерение удельного сопротивления германия методом точечного контакта. — «Ое буцури», 1963, т. 32, № 9, с. 706—708 (перевод ВИНТИ № 46284/4. М., 1965).
32. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. М., Энергия, 1971. 352 с.
33. Карамашева А. Ф. Датчики ЭДС Холла на основе мышьяковистого индия. — Вестн. электропромышленности, 1962, т. 33, вып. 1., с. 59—63.
34. Кривоносов А. И. Новые полупроводниковые датчики температуры. — Приборы и системы управления, 1971, № 9, с. 37—41.
35. Ксенофонтов М. Е. Упругие элементы тензопреобразователей из сапфира. — Приборы и системы управления, 1970, № 3, с. 61.
36. Ларионов Л. В., Осипович Л. А., Нерославский И. А. Линеаризация емкостного преобразователя давления. — Приборы и системы управления, 1977, № 11, с. 33—35.
37. Логинов В. В. Электрические измерения механических величин. М., Энергия, 1976. 104 с.
38. Матаушек И. Ультразвуковая техника. Металлургиздат, 1962. 511 с.
39. Методы и приборы расходомерии. Тематическая подборка

ка. — Приборы и системы управления, 1972, № 9; № 10, с. 15—30, 35—49; № 11, с. 11—30, 35—52.

40. Меницкий Д. Н. Методы измерения и регистрации в клинико-физиологических исследованиях. — В кн.: Физиологические методы в клинической практике. Л., Медгиз, 1959, с. 479—568.

41. Милохин Н. Г. Частотные датчики систем автоконтроля и управления. М., Энергия, 1968. 128 с.

42. Молдавер Т. И., Гук Г. Н., Городецкий А. Ф. Некоторые вопросы наклеек полупроводниковых тензорезисторов. Труды III конференции по полупроводниковой тензометрии. Новосибирск, изд. НЭТИ, 1969.

43. Максудов Ф. М. Термосопротивления с косвенным подогревом. — В кн.: Применение полупроводников в приборостроении. М., Машгиз, 1958.

44. Молдавер Т. И., Гук Г. Н. Клей для полупроводниковых тензорезисторов. — Приборы и системы управления, 1969, № 11, с. 56—57.

45. Мэшин К. Датчики. — В кн.: П. Дональдсон. «Электронные приборы в биологии и медицине». М., ИЛ., 1963, с. 496—533.

46. Нечаев Г. К. Новая схема устройства температурного контроля с применением термосопротивлений. — Электричество, 1960, № 6, с. 85—88.

47. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. М., Энергия, 1970. 423 с.

48. Осипович Л. А., Быстрова В. И., Кузнецова Е. П. Трехкомпонентный датчик с колпачковой мембраной для изучения переуплотнения почвы при обработке. Сб. трудов по агрономической физике. Вып. 37. Л., изд. АФИ, 1977, с. 142—150.

49. Осипович Л. А., Рогачев А. И., Ксенофонтов М. Е. Миниатюрные датчики для биомедицинских исследований — Приборы и системы управления, 1972, № 5, с. 25—27.

50. Осипович Л. А., Смыслов И. И. Малогабаритный полупроводниковый датчик давления. — Приборы и системы управления, 1965, № 10, с. 24—25.

51. Дифференциальный полупроводниковый датчик давления / Осипович Л. А., Шиф М. И., Лещинская Э. И., Колесников А. Н. — Приборы и системы управления, 1969, № 3, с. 46—47.

52. Осипович Л. А. Заделка в корпус прибора плоских мембран с помощью сварки. — Приборы и системы управления, 1970, № 10, с. 55.

53. Осипович Л. А. Миниатюрные сварные сильфоны. — Приборы и системы управления. 1967, № 11, с. 51—52.

54. Осипович Л. А., Смыслов И. И. О перспективах применения металлических клеев. — Приборостроение, 1966, № 4, с. 20.

55. Осипович Л. А., Васильцов В. Н., Кузнецова Е. П. Резонансная схема включения тензорезисторов. — Приборы и системы управления, 1976, № 6, с. 37—39.

56. Осипович Л. А., Смыслов И. И. Технология изготовления полупроводниковых тензодатчиков из дендритной ленты германия. — Приборостроение, 1966, № 2, с. 14—16.

57. Осипович Л. А. Температурные характеристики миниатюрных полупроводниковых тензоэлементов из германия и кремния. — Приборы и системы управления, 1967, № 1, с. 45—46.

58. Осипович Л. А., Ксенофонтов М. Е. Полупроводниковый

датчик температуры. — Приборы и системы управления, 1967, № 11, с. 46.

59. **Осипович Л. А.** Полупроводниковый датчик кровяного давления. Сборник докладов II-й конференции по полупроводниковым тензодатчикам. М., 1967.

60. **Осипович Л. А.** Способ исследования циркуляции крови. Авт. свид. № 251774. — Открытия, изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки, 1969, № 28, с. 62.

61. **Осипович Л. А.** 3-е всесоюзное совещание по полупроводниковой тензометрии. — Приборы и системы управления, 1968, № 1, с. 61.

62. **Осипович Л. А.** Прецизионные пьезокварцевые датчики вибрационных ускорений типа ПКД. — Приборостроение, 1964, № 5, с. 19—21.

63. **Осипович Л. А.** Вибродатчики для прецизионных измерений. Сб. «Вибрационная техника», изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1964, с. 31—57.

64. **Осипович Л. А.** Модернизация датчиков типа ПКД. — Приборостроение, 1965, № 4, с. 19—20.

65. **Осипович Л. А.** Датчики для прецизионных измерений глубины погружения и температуры морской воды. — В кн.: Автоматизация научных исследований морей и океанов». Часть 1. Севастополь, изд. МГИ АН УССР, 1972.

66. **Осипович Л. А.** Полупроводниковый шуп контактных давлений. — Приборы и системы управления, 1970, № 2, с. 51, 55.

67. **Осипович Л. А., Стердигов Б. В.** О применении чувствительного элемента Холла в миниатюрных датчиках давления. — Труды СЗПИ, Л., 1968, № 3, с. 59.

68. **Осипович Л. А.** Прецизионный емкостный датчик давления. — Приборы и системы управления, 1977, № 9, с. 42—43.

69. **Осипович Л. А., Рогачев А. И.** К вопросу применения струнных преобразователей для измерения параметров гемодинамики. — В кн.: Материалы II Всесоюзного семинара «Физические методы и вопросы метрологии медицинских измерений», М., изд. ВНИФТРИ, 1972, с. 77—79.

70. **Осипович Л. А., Рогачев А. И.** Способы заделки струн в струнных преобразователях. — Труды СЗПИ, Л., 1972, № 22, с. 41—43.

71. **Осипович Л. А.** Стенды для исследования ротационной чувствительности вибродатчиков. Виброметрия. Сборник 2, изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1965, с. 44—50.

72. **Осипович Л. А., Кузнецова Е. П.** Полупроводниковый датчик давления почвы. — Приборы и системы управления, 1973, № 7, с. 41—42.

73. **Островский Л. А.** Основы общей теории электроизмерительных устройств. М., Энергия, 1971. 544 с.

74. **Пеленский Р. А.** Дифференциальные измерительные схемы на трансформаторах тока для полупроводниковой тензометрии. Полупроводниковые тензодатчики. Сб. статей. М., Онтиприбор, 1967, с. 100—108.

75. **Пинскер А. П.** Применение полупроводниковых генераторов Холла в автоматике. Киев, Гостехиздат УССР, 1961. 122 с.

76. **Полупроводниковые тензодатчики** / Под ред. М. Дина. М.—Л., Энергия, 1965. 215 с.

77. Пучкин Б. И. Приклеиваемые тензодатчики сопротивления. М.—Л., Энергия, 1966.
78. Пятин Ю. М. Новые магнитные материалы и будущее постоянных магнитов. — Приборы и системы управления, 1972, № 3, с. 47—49.
79. Раевский Н. П., Субботин М. И. Измерение линейных ускорений. М., Изд-во, АН СССР, 1961. 64 с.
80. Расчет и конструирование расходомеров / Под ред. П. П. Кремлевского, Л., Машиностроение, 1978.
81. Ротберг И. Л., Удалов Н. П. О возможности применения полупроводниковых диодов и триодов в качестве датчиков температуры. — Приборостроение, 1963, № 10.
82. Рогачев А. И. Библиография по струнным преобразователям. — Приборы и системы управления, 1972, № 2, с. 53—54.
83. Рогачев А. И. Струнный метод в технике точных измерений. — Труды СЗПИ, Л., 1972, № 22, с. 33—37.
84. Сандулова А. В., Марьямова И. И., Заганяч Ю. И. Измерительные характеристики полупроводниковых тензорезисторов типа «Кремнистор». Труды III совещания по полупроводниковой тензометрии, Новосибирск, изд. НЭТИ, 1969, с. 182—187.
85. Семенов А. Г. Электроманометр с миниатюрным датчиком давления. — Медицинская промышленность СССР, 1956, № 4, с. 28—31.
86. Сильфоны. Расчет и проектирование. / Под ред. Л. Е. Андреевой. М., Машиностроение, 1975, 156 с.
87. Смыслов И. И., Субботин М. И. Применение металлического клея при изготовлении пьезодатчиков. — Приборы и техника эксперимента, 1964, № 1, с. 226.
88. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температуры. М., изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1970. 258 с.
89. Сотсков Б. С. Основы расчета и проектирования автоматических и телеметрических устройств. М., Госэнергоиздат, 1953. 544 с.
90. Стэси Р. Электроника для биологов и медиков. М., Госэнергоиздат, 1962. 311 с.
91. Субботин М. И. О чувствительности виброизмерительных приборов с тензодатчиками. — Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1959, № 4, с. 163—164.
92. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М., Наука, 1967. 444 с.
93. Тихменев С. С. Элементы точных приборов. М., Оборонгиз, 1956. 360 с.
94. Тумановский М. Н. — В кн.: Электроника и химия в кардиологии. Воронеж, изд. Воронежского университета, 1965, вып. 2, с. 13.
95. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М., Энергия, 1966. 690 с.
96. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики. М., Энергия, 1965. 239 с.
97. Феодосьев В. И. Упругие элементы точного приборостроения. М., Оборонгиз, 1949. 343 с.
98. Феодосьев В. И. О больших прогибах и устойчивости круглой мембраны с мелкой гофрировкой. — Прикладная математика и механика, 1945, т. IX, вып. V.
99. Феодосьев В. И. Расчет круглых симметрично-нагруженных

пластинок и тонкостенных цилиндров. Редиздат ГУУЗ—МАИ. М., 1946. 32 с.

100. **Фиш М. Л.** Химотронные приборы в автоматике. Киев, Техника, 1967. 240 с.

101. **Форейт И.** Емкостные датчики неэлектрических величин. М., Энергия, 1966. 159 с.

102. **Ференци Е.** Конструирование приборов точной механики. М., Машиностроение, 1964. 279 с.

103. **Фридлендер Г. О., Селезнев К. П.** Пилотажные манометрические приборы, компасы и автоштурманы. Оборонгиз, 1953, 368 с.

104. **Хаятин В. М.** Применение механотронов для измерения биомеханических процессов. Сб. статей «Электроника в медицине», М., Госэнергоиздат, 1960.

105. **Хомерики О. К.** Применение гальваномагнитных датчиков в устройствах автоматики и измерений. М., Энергия, 1971. 112 с.

106. **Хомерики О. К.** Гальваномагнитные датчики в приборостроении. — Приборы и системы управления, 1972, № 7, с. 13—15.

107. **Черняк К. И.** Эпоксидные компаунды и их применение. Л., Судпромгиз, 1963. 256 с.

108. **Шефтель И. Т.** Термосопротивления. Гостехиздат, 1958.

109. Основные характеристики и параметры промышленных терморезисторов — термометров сопротивления / И. Т. Шефтель, Г. Н. Текстер-Проскурякова, Б. Б. Лейкина, Я. В. Павлоцкий, Э. С. Чеботарева. — Приборы и системы управления, 1971, № 9, с. 32—36.

110. **Электрические измерения неэлектрических величин.** Под редакцией П. В. Новицкого. М., Энергия, 1975. 576 с.

Предисловие	3
Введение	4
1. Об определениях и классификации датчиков	4
2. Общие свойства датчиков	5
3. Основные требования к датчикам	9
4. Надежность и вопросы миниатюризации	13
ГЛАВА I. Упругие элементы датчиков	13
1. Основные характеристики и конструктивные формы упругих элементов	13
2. Расчет плоских колпачковых мембран с краевым гофром	25
3. Соединение концов тензометрических балок с центром мембран	27
4. Влияние градиента температур между мембраной и корпусом датчика на чувствительность	30
5. Запаздывание в передаче давлений мембранными упругими элементами	33
6. Вопросы технологии изготовления упругих элементов новых типов	35
ГЛАВА II. Чувствительные элементы датчиков	41
1. Основные типы чувствительных элементов датчиков	41
2. Тензометрические полупроводниковые чувствительные элементы	42
3. Гальваномагнитные чувствительные элементы	63
4. Пьезочувствительные элементы	72
5. Емкостные чувствительные элементы	76
6. Температурные чувствительные элементы	84
ГЛАВА III. Датчики давления	96
1. Полупроводниковые тензометрические датчики	96
2. Гальваномагнитные датчики	107
3. Емкостные датчики	108
4. Струнные датчики	111
ГЛАВА IV. Датчики параметров вибрации	117
1. Прецизионные малогабаритные пьезодатчики вибрационных ускорений	117

2. Пути снижения поперечной паразитной чувствительности и способы измерения ротационной чувствительности	120
ГЛАВА V. Датчики газовых расходомеров	124
1. Полупроводниковые тензорезисторные датчики	124
2. Полупроводниковый гальваноманитный датчик	129
3. Напорный расходомер с линейной характеристикой	130
ГЛАВА VI. Датчики температуры	132
1. Датчики температуры с проволочными чувствительными элементами	132
2. Датчики температуры из монокристаллического германия	133
3. Галлиевые сплавы (металлические клеи) как новый конструктивный элемент датчиков температуры	134
4. Динамические характеристики датчиков температуры	138
ПРИЛОЖЕНИЕ I. Расчет чувствительности и частотных характеристик полупроводниковых датчиков давления с плоскими мембранами	141
ПРИЛОЖЕНИЕ II. Методика расчета чувствительности полупроводниковых датчиков расхода	147
Список литературы	152

ИБ № 2517

Леонид Алексеевич Осипович

ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Редактор *Л. К. Тучкова*

Технический редактор *И. Н. Раченкова*

Корректор *А. М. Усачева*

Сдано в набор 24.01.79. Подписано в печать 04.06.79. Т-08167 Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 8,4 Уч.-изд. л. 9,9 Тираж 11 000 экз. Заказ № 157. Цена 50 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, ГСП-6,
1-й Басманный пер., 3

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

50 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»