

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Часть 2

*Допущено Ученым советом Нижегородского государственного
технического университета им. Р.Е. Алексеева в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Прикладная механика»*

Нижний Новгород 2018

УДК 531.7.08, 620.1.08

ББК 30.10

В 40

Рецензент

доктор технических наук, профессор *В.М. Родюшкин*

В 40 **Вешуткин, В. Д. Экспериментальная механика:** учеб. пособие. Часть 2 / В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 114 с.

ISBN 978-5-502-00803-7

ISBN 978-5-502-01120-4 (ч. 2)

Во второй части пособия «Экспериментальная механика» приводятся подробные сведения о технических средствах измерения различных величин: массы, сил и моментов сил, линейных и угловых размерах, деформаций и температуры, а также изложены основы математической теории планирования эксперимента.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная механика», а также студентов других направлений и специальностей, программа обучения которых предусматривает изучение дисциплины «Экспериментальная механика».

Рис. 57. Табл. 32. Библиогр.: 41 назв.

УДК 531.7.08, 620.1.08

ББК 30.10

ISBN 978-5-502-00803-7

ISBN 978-5-502-01120-4 (ч. 2)

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2018

© Вешуткин В.Д., Жуков А. Е., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ	6
2. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ СИЛ	19
2.1. Силы и методы их измерения	19
2.2. Общие принципы конструирования динамометров	21
2.3. Общая структурная схема динамометра	23
2.4. Формы упругих элементов	27
2.5. Определение размеров поперечного сечения упругого элемента	29
2.6. Оценка нелинейности упругих элементов.....	32
2.7. Схемы соединения тензорезисторов	34
3. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ	38
3.1. Измерение линейных размеров	38
3.2. Средства контроля и разметки углов	44
4. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ	50
4.1. Тензометрические методы измерения деформаций	50
4.1.1. Механические и оптические тензометры	50
4.1.2. Тензометры сопротивления	51
4.1.3. Полупроводниковые тензорезисторы	58
4.2. Оптоволоконные датчики деформации	71
5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	74
5.1. Физические основы термометрии	74
5.2. Контактные методы термометрии	74
5.3. Бесконтактные методы термометрии	94
6. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	98
6.1. Научный подход к планированию эксперимента	98
6.2. Основы планирования многофакторного эксперимента	101
6.3. Критерии оптимальности и типы планов	106
6.4. Основные термины и определения ТПЭ	108
Список литературы	111

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
АЧТ	— абсолютно черное тело
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
ВОТ	— волоконно-оптические термометры
ДФЭ	— дробный факторный эксперимент
ДФП	— дробный факторный план
ЖК	— жидкокристаллический
ИВ	— измеряемая величина
ИК	— инфракрасный
ИП	— ионизационный преобразователь; измерительный преобразователь; измерительный прибор
КГИ	— коэффициент гармонических искажений
КНИ	— коэффициент нелинейных искажений
ЛП	— лазерные пирометры
МНК	— метод наименьших квадратов
МП	— матрица планирования
НДС	— напряженно-деформированное состояние
НмПВ	— наименьший предел взвешивания
ПИП	— первичный измерительный преобразователь
ПП	— первичный преобразователь
ПрП	— промежуточный преобразователь
ПФП	— полный факторный план
ПФЭ	— полный факторный эксперимент
РУ	— регулирующее (или показывающее) устройство
СВЧ	— сверхвысокочастотное излучение
СИ	— средство измерения; также Международная система единиц
ТКС	— температурный коэффициент сопротивления
ТПЭ	— теория планирования эксперимента
ТР	— тензорезистор
ТТТ	— термотранзисторные термометры
ТЭДС	— термоэлектродвижущая сила
ФВ	— физическая величина, физические величины
ФП	— факторное пространство
ФЧХ	— фазочастотная характеристика
ФЭУ	— фотоэлектронный умножитель
ЦАП	— цифроаналоговый преобразователь
ЭДС	— электродвижущая сила

ПРЕДИСЛОВИЕ

Во второй части пособия «Экспериментальная механика» приводятся подробные сведения о технических средствах измерения различных величин: массы, сил и моментов сил, линейных и угловых размерах, деформаций и температуры, а также изложены основы математической теории планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования широко применяются на всех стадиях разработки, производства и эксплуатации различных технических объектов. При этом средства измерения играют одну из первостепенных ролей. К средствам измерений относят измерительные инструменты, приборы и установки. Они являются неотъемлемой частью эксперимента и дают всю необходимую информацию. В то же время теория планирования эксперимента формулирует приемы и способы оптимальной организации исследовательской работы. Овладение основами теории эксперимента и практическими приемами ее использования повышает эффективность работы исследователя и позволяет с наименьшими затратами решать многие практически важные исследовательские задачи.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основы метрологии, характеристики средств измерений, принципы построения преобразователей неэлектрических величин в электрические, методы планирования и организации эксперимента; уметь планировать экспериментальные исследования, проводить их и выполнять обработку экспериментальных данных, владеть навыками работы с современными приборами и системами для измерений и обработки результатов наблюдений, а также навыками выбора необходимых средств измерений для решения задач, поставленных в эксперименте.

Пособие соответствует рабочей программе дисциплины «Экспериментальная механика» и предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки «Прикладная механика», а также может быть полезным для студентов других направлений и специальностей, чья программа обучения предусматривает изучение дисциплины «Экспериментальная механика».

1. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ

Измерение массы является наиболее распространенным видом измерений во всем мире, поэтому особенно в последнее время появилось большое количество разнообразной весовой техники, которая позволяет удовлетворить любые требования потребителя. В настоящее время для определения массы применяют разнообразные типы и модели весов нескольких поколений. Классификация весов по применению и назначению приведена на рис. 1.1.

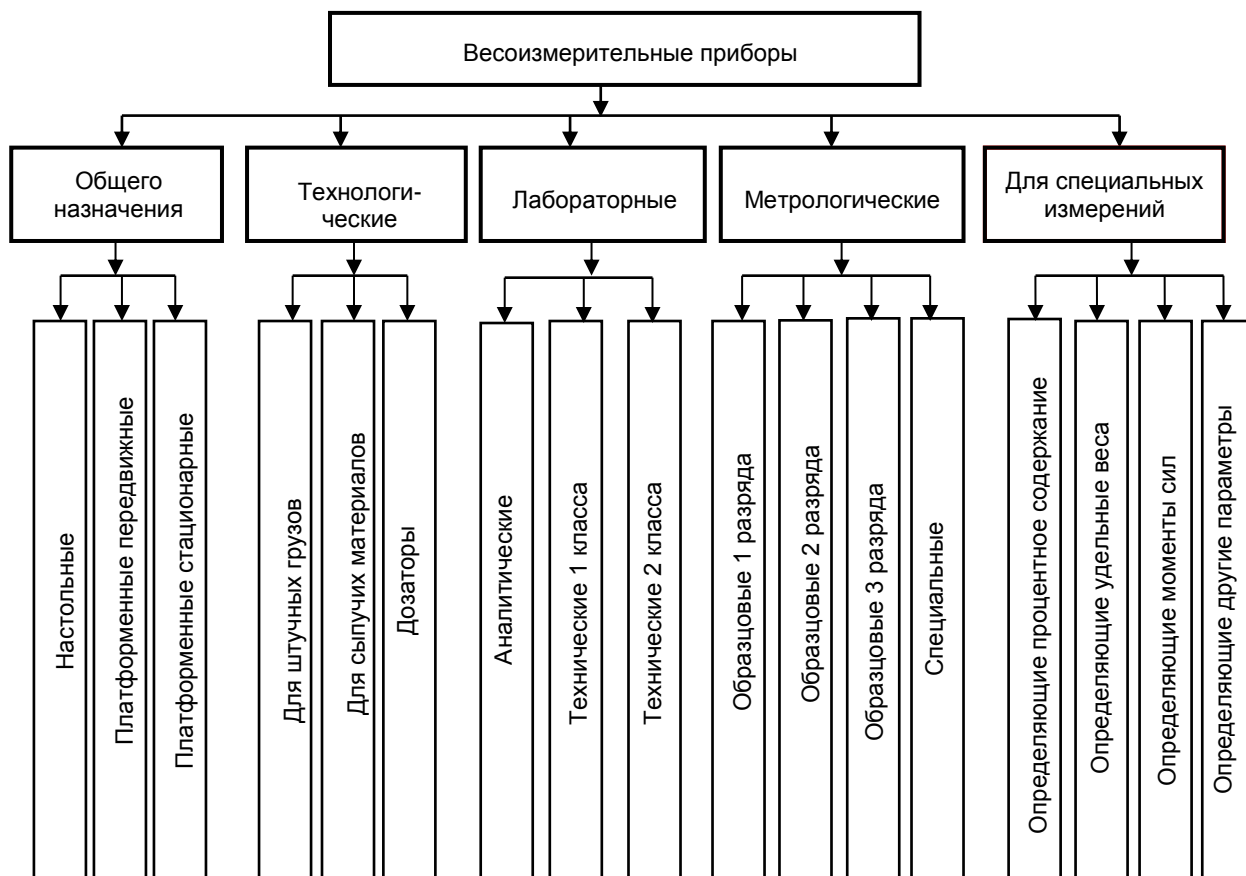


Рис. 1.1. Общая классификация весов по назначению

По назначению все весы можно разделить на пять основных групп:

- 1) общего назначения;
- 2) технологические;
- 3) лабораторные;
- 4) метрологические;
- 5) для специальных измерений.

Весы общего назначения используются в торговле, складском хозяйстве, во всех отраслях промышленности и на транспорте:

- настольные весы обычно используются для нагрузок до 20 кг;

- платформенные передвижные весы используют для измерения массы от 50 кг до 3 т;
- стационарные платформенные весы используют для больших предельных нагрузок – свыше 3 т (автомобильные, вагонеточные и вагонные весы).

Технологические весы применяются в различных отраслях промышленности для встраивания их в технологические линии в качестве дозаторов, для дозирования и взвешивания сыпучих и штучных грузов.

Лабораторные весы предназначены для взвешивания тел массой до 1,5 кг с высокой точностью показаний. Они, как правило, требуют особых условий и методов взвешивания.

Метрологические весы служат для проведения различных проверочных работ. Образцовые весы используются на производстве и в торговле, где требуется высокая точность показаний. Применяются они также в финансовых организациях для взвешивания драгоценностей, в лабораториях и на предприятиях в отделах технического контроля.

Весы для специальных измерений служат не для определения непосредственно массы, а для измерения других параметров: природы зерна, удельного веса жидкостей, содержания влаги, определения крутящегося момента двигателей и т. п.

По конструкции взвешивающего устройства весы бывают рычажные и электромеханические.

По степени автоматизации процесса взвешивания весы делятся: на автоматические, полуавтоматические и неавтоматические.

По частоте взвешивания можно выделить весы:

- дискретного (непрерывного) действия, на которых взвешивание осуществляется в течение определенного повторяющегося цикла;
- единичного взвешивания, на которых снимаются показания результатов каждого взвешивания;
- непрерывного действия, на которых взвешивание сыпучих материалов или жидкости осуществляется непрерывно.

По виду указательного устройства весы подразделяют:

- на гирные;
- шкальные;
- шкально-гирные;
- циферблатные;
- циферблатно-гирные;
- оптические;
- электронно-индикаторные.

На шкальных весах величину массы устанавливают по шкале (или шкалам) после достижения равновесия перемещением по ней передвижной встроенной гири.

На циферблатных весах массу определяют по круговой шкале, на циферблатно-гирных – путем суммирования массы уравнивающих гирь и показаний стрелки циферблата.

На оптических весах показания взвешивания снимают с экрана, на который проецируется микрошкала со значением массы.

В электронных весах значения массы товара считываются с индикаторного электронного табло, на котором может указываться также стоимость товара.

По способу установки весы делятся:

- на стационарные (рис. 1.2);
- передвижные (рис. 1.3);
- настольные (рис. 1.4);
- напольные (рис. 1.5);
- врезные (рис. 1.6);
- встроенные (рис. 1.7).



Рис. 1.2. Стационарные автомобильные весы до 100 т измеряемой массы



Рис. 1.3. Передвижные автомобильные весы на 20 т



Рис. 1.4. Настольные весы



Рис. 1.5. Напольные весы



Рис. 1.6. Врезные платформенные весы

а)



б)



Рис. 1.7. Встроенные весы:
а – монорельсовые; *б* – крановые

Стационарные весы устанавливают на постоянном месте эксплуатации таким образом, что их перемещение невозможно без демонтажа (см. рис. 1.2).

Передвижные весы не связаны с постоянным местом эксплуатации. Они перемещаются с помощью установленного на них привода, сторонних транспортных средств или вручную (см. рис. 1.3).

К настольным относят весы циферблатные, лотковые, оптические и электронные (рис. 1.4).

Напольные весы используют чаще всего на складах. Их устанавливают незакрепленными на постоянном месте, с возможностью их передвижения. Как вариант – они выполняются передвигаемыми на роликах или колесиках (рис. 1.5).

Врезные весы устанавливают в котловине или проеме междуэтажных конструкций таким образом, чтобы грузоприемная платформа находилась на одном уровне с полом (рис. 1.6).

Встроенные весы вмонтированы в машины, приборы, транспортные устройства (рис. 1.7).

По виду отсчета показаний различают весы:

- с визуальным определением показаний;
- документальным определением показаний.

Визуальный отсчет – это непосредственное считывание показаний с циферблата, экрана, табло или суммирование значений уравновешивающих гирь.

Документальный отсчет – регистрация результатов взвешивания путем печатания показаний на чеке или ленте.

По способу снятия показаний весы бывают:

- с местным снятием показаний;
- дистанционным снятием показаний.

Каждому типу и модели весов присвоены буквенные и цифровые индексы, характеризующие некоторые технические и эксплуатационные особенности их устройства.

Первая буква индекса характеризует устройство весов (Р – рычажные, Т – электронно-тензометрические).

Вторая – способ установки на месте эксплуатации (Н – настольные, П – передвижные, С – стационарные).

Цифра после первых двух букв означает наибольший предел взвешивания: до 1000 кг – в килограммах, свыше – в тоннах.

Следующая буква означает тип указательного устройства (Г – гирные, Ш – шкальные, Ц – циферблатные).

Цифра, стоящая за одной из этих букв, характеризует вид отсчета:

- 1 – визуальный отсчет;
- 2 – документальный отсчет.

Последняя цифра обозначает способ снятия показаний:

- 3 – местный способ;
- 4 – дистанционный способ.

Например, весы РН10Ц13 являются рычажными, настольными, с наибольшим пределом взвешивания 10 кг, циферблатными, с визуальным отсчетным устройством и местным определением показаний взвешивания.

Буквы в конце наименования модели некоторых весов указывают на какие-либо особенности весов (А – автомобильные, В – вагонные, М, Б – малая или большая платформа). Так, весы ТС-150Ц24В – электронно-тензометрические, стационарные, с наибольшим пределом взвешивания 150 т, циферблатные, с документальной регистрацией и дистанционной передачей показаний, вагонные.

Основные методы измерения массы делятся на две большие группы: механические и электромеханические.

К механическим относятся:

1) гравитационное сравнение масс (взвешивание):

- гирное;
- коромысловое;
- маятниковое;

2) комбинированное:

- с накладными гирями;
- со встроенными гирями.

3) измерение силы гравитации;

- гироскопическое;
- упругое;
- пружинное;
- торсионное.

К электромеханическим методам относятся:

1) инерционный метод:

- измерение ускорения;
- измерение частоты или периода колебаний;
- измерение объема и плотности;

2) магнитоэлектрический;

3) электродинамический;

4) электростатический (тензорезисторный, вибростержневой, магнитоупругий, пьезоэлектрический).

Наиболее распространённым методом измерения массы является *гравитационный*. Он основан на уравновешивании силы гравитационного притяжения тела к земле другой силой и ее измерение. Гравитационный метод измерения массы разделяют на метод сравнения масс (гравитацион-

ное уравнивание) и метод измерения силы гравитационного притяжения тела к Земле. Способ уравнивания является одним из основных принципов классификации приборов для измерения массы по конструктивным признакам. Приборы для измерения массы, которые используют метод сравнения масс, делятся:

- на гирные (наложение гирь);
- коромысловые (перемещение груза по коромыслу);
- маятниковые или квадрантные (поворот маятника).

Отличительной особенностью приборов с гравитационным уравниванием является независимость их показаний от ускорения свободного падения в точке их нахождения на поверхности Земли. Они обладают высокой точностью при сравнительной простоте. Приборы, которые используют метод сравнения, получили наиболее широкое распространение. Они обладают высокой производительностью при сравнительной простоте, поэтому и получили широкое распространение.

Более высокой производительностью обладают весы с маятниковым уравнивающим механизмом. Результат измерения отсчитывают по шкале циферблата. Для расширения диапазона взвешивания, на весах с маятниковым уравнивающим механизмом, применяют накладные гири, а также указатели с многооборотной стрелкой и автоматическим переключением диапазонов. В случае использования гирь, результат взвешивания определяется как сумма массы, определенный по шкале циферблата и массы уравновешенной накладными гирями.

Другим, наиболее перспективным методом определения массы тела, является измерение силы тяжести, действующей на грузоприемное устройство. В основу метода положены такие способы уравнивания силы, как упругое уравнивание, гироскопический эффект, а также способ компенсации. В этом методе результаты измерения зависят от места расположения прибора на поверхности земли. Таким образом, градуировка весов зависит от ускорения свободного падения, то есть от места нахождения весов.

Простейшим весовым механизмом, использующим упругое уравнивание, является пружина (спиральная, тарельчатая, плоская). Способ упругого уравнивания реализуется в измерительных устройствах, построенных на базе первичных преобразователей неэлектрических величин в электрические.

Тензорезисторный тип преобразователя нашел наиболее широкое применение в весовой технике. Он основан на изменении сопротивления тензорезисторов, наклеенных непосредственно на упругий элемент, который получает деформацию под действием сил веса. Изменение сопротивления тензорезисторов, объединенных в мостовую схему, в измеритель-

ной цепи преобразуется в изменение электрического напряжения, пропорциональное измеряемой силе веса.

Тензорезисторный тип преобразователя (датчика) нашел такое широкое применение во всем мире по следующим причинам:

- высокое качество тензорезисторов (ТР), обусловленное современными технологиями при их изготовлении;
- простота изготовления датчиков, не требующая сложного технологического оборудования при массовом производстве;
- низкая стоимость в сочетании с высокими техническими характеристиками;
- возможность простыми техническими средствами компенсировать влияние внешних факторов;
- стабильность характеристик в течение всего срока службы.

Анализ мирового рынка весов показал, что основные фирмы-производители весового оборудования выпускают весы, построенные на тензометрических преобразователях. Повышение точности аппаратуры для тензорезисторных преобразователей обеспечило снижение погрешности измерения массы до 0,03%, что и определило их широкое распространение.

Весы с электромеханическими преобразователями структурно состоят из грузоприемного устройства, первичного преобразователя и блока обработки информации. Функциональная блок-схема приведена на рис. 1.8.

В соответствии с ГОСТ 53228 – 2008 для однозначности толкования используются следующие определения:

- *поверочное деление «e»* – величина, выраженная в единицах массы и применяемая для классификации и при поверке весов;
- *действительная цена деления (шкалы) «d»* – разность, выраженная в единицах массы, между двумя значениями, соответствующими двум соседним отметкам шкалы для аналоговой индикации или последовательными показаниями для цифровой индикации;
- *цена деления оцифрованной шкалы* – значение разности между двумя последовательными числовыми отметками шкалы;
- *число поверочных делений «n»* – отношение значения максимальной нагрузки к значению поверочного деления $n = \max/e$.

Весы классифицируют в зависимости:

- от значения поверочного деления, характеризующего их абсолютную погрешность;
- от числа поверочных делений, характеризующего их относительную погрешность.

Пределы допускаемой погрешности весов имеют порядок значения поверочного деления.

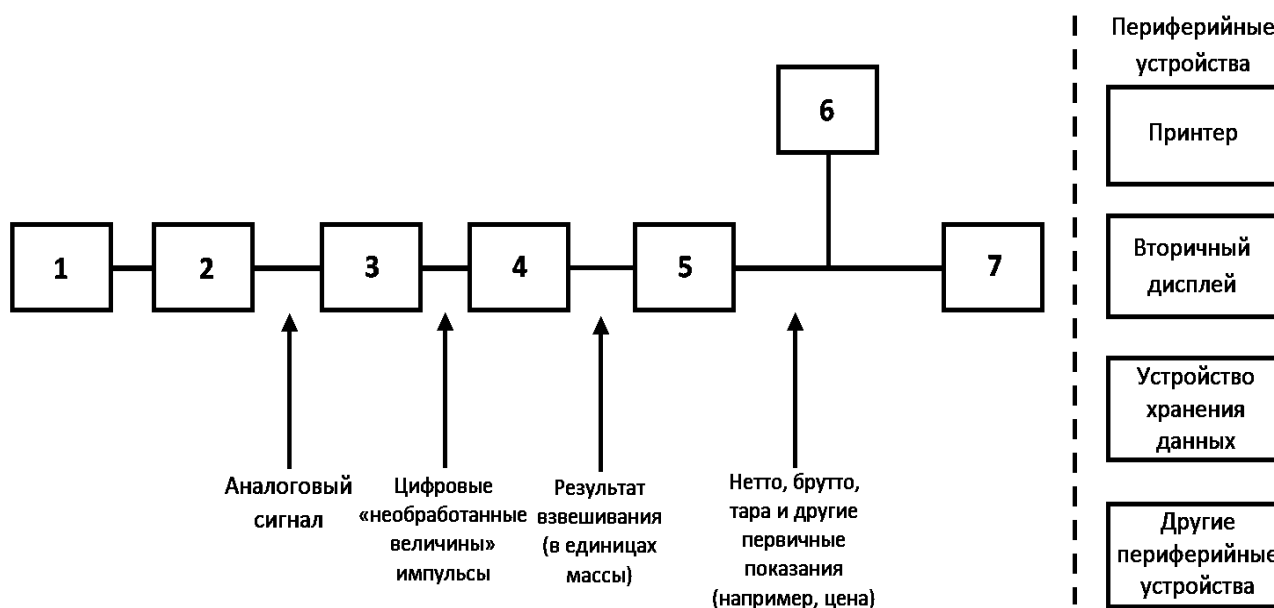


Рис. 1.8. Функциональная блок-схема весов и состав типичных модулей:

1 – электрические и механические элементы связи; 2 – аналоговый первичный преобразователь; 3 – аналого-цифровой преобразователь (ADC); 4 – преобразователь информации (определение массы); 5 – последующий преобразователь (например, тарирование, вычисление стоимости); 6 – клавиша (клавиши) или клавиатура оператора; 7 – первичный дисплей

Все весы по точности разделены на четыре класса, которые приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Классы точности весов

Класс точности	Обозначение, наносимое на весы	Обозначение, применяемое в документации
Специальный	Ⓘ	I
Высокий	Ⓢ	II
Средний	Ⓢ	III
Обычный	Ⓢ	III

В обозначении допускается использовать овалы любой формы или две горизонтальные линии, соединенные двумя полукругами.

Значение поверочного деления, число поверочных делений и минимальная нагрузка, характеризующие класс точности весов, указаны в табл. 1.2. Для многодиапазонных весов значения максимальной нагрузки каждого поддиапазона взвешивания, кроме последнего, должны удовлетворять требованиям, приведенным в данной таблице.

Таблица 1.2. Требования классов точности

Класс точности	Поверочное деление e	Число поверочных делений $n = \max_i/e$		Минимальная нагрузка \min (нижний предел) или НмПВ	Для многодиапазонных весов $n = \max_i/e_{i+1}$
		минимальное	максимальное		
I Специальный	$0,001 \text{ г} \leq e$	50000	> 50000	$100 e$	≥ 50000
II Высокий	$0,001 \text{ г} \leq e \leq 0,05 \text{ г}$ $0,1 \text{ г} \leq e$	100 5000	100000 100000	$20 e$ $50 e$	5000
III Средний	$0,1 \text{ г} \leq e \leq 2 \text{ г}$ $5 \text{ г} \leq e$	100 500	10000 10000	$20 e$ $20 e$	500
III Обычный	$5 \text{ г} \leq e$	100	1000	$10 e$	50

Пределы допускаемой погрешности при поверке весов в зависимости от класса их точности приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Погрешности весов

Пределы допускаемой погрешности при поверке	Для нагрузки m , выраженной в поверочных делениях e			
	Класс I	Класс II	Класс III	Класс III
$\pm 0,5 e$	$0 \leq m \leq 50000$	$0 \leq m \leq 5000$	$0 \leq m \leq 500$	$0 \leq m \leq 50$
$\pm 1,0 e$	$50000 < m \leq 200000$	$5000 < m \leq 20000$	$500 < m \leq 2000$	$50 < m \leq 200$
$\pm 1,5 e$	$200000 < m$	$20000 < m \leq 100000$	$2000 < m \leq 10000$	$200 < m \leq 1000$

Минимальная нагрузка \min установлена, чтобы показать, что взвешивание масс ниже заданного значения приведет к большим относительным погрешностям.

Пределы допускаемой погрешности в эксплуатации (у пользователя) (табл. 1.4) равны удвоенному значению пределов допускаемых погрешностей при поверке (табл. 1.5).

Таблица 1.4. Пределы допускаемой погрешности при поверке

При нагрузках	Пределы допускаемой погрешности при поверке
От 20 до 200 кг включительно	$\pm 0,5 e = \pm 0,5 \text{ кг}$
Свыше 500 до 2000 кг включительно	$\pm 1,0 e = \pm 1,0 \text{ кг}$
Свыше 2000 до 3000 кг включительно	$\pm 1,5 e = \pm 1,5 \text{ кг}$

Примечание: при выборе весов и оценке точности выполняемых на весах взвешиваний пользователь должен исходить из удвоенных пределов допускаемых погрешностей при поверке.

Таблица 1.5. Пределы допускаемой погрешности при эксплуатации

При нагрузках	Пределы допускаемой погрешности в эксплуатации
От 20 до 200 кг включительно	$\pm 1 e = \pm 1$ кг
Свыше 500 до 2000 кг включительно	$\pm 2 e = \pm 2$ кг
Свыше 2000 до 3000 кг включительно	$\pm 3 e = \pm 3$ кг

Минимальную нагрузку \min весов определяют в соответствии с требованиями табл. 1.3. При этом в последней колонке значение поверочного деления « e », нужно заменить значением действительной цены деления шкалы d .

Пример. Весы класса точности III, $n = 3000$, $\max = 3000$ кг, $e = 1$ кг, $\min = 20$ кг. При поверке (первичной, периодической, внеочередной и т. д.) весы будут признаны годными, если погрешности весов не превысят установленных допускаемых значений.

Пример приведен для иллюстрации различия в понятиях пределов допускаемой погрешности при поверке и в эксплуатации.

Поверочное деление « e » определяют из следующего выражения $d < e \leq 10d$ (см. табл. 1.6), $e = 10^k$ кг; где k – положительное, отрицательное целое число или ноль.

Таблица 1.6. Поверочное деление

d , г	e , г	e_{\max}
0,1	1	$10d$
0,2	1	$5d$
0,5	1	$2d$
0,01	1	$100d$
0,02	1	$50d$
0,05	1	$20d$
< 0,01 мг	1	$100d$

В качестве упругих элементов чаще всего используют сдвоенные (рис. 1.9, a ; рис. 1.10, a) или счетверенные балочки двойного изгиба («механический мост», рис. 1.9, b), сдвиговые элементы (рис. 1.9, b ; рис. 1.10, b) и изгибные элементы (рис. 1.9, z ; рис. 1.10, b).

Многообразие конструктивных особенностей электронных весов обуславливает дополнительные признаки классификации, которые приведены далее.

1. По конструкции отсчетного устройства (дисплея):

- светодиодный;
- жидкокристаллический;
- люминесцентный;

- флюоресцентный.
- По конструкции сканера:
- фотоэлектрический;
- лазерный.

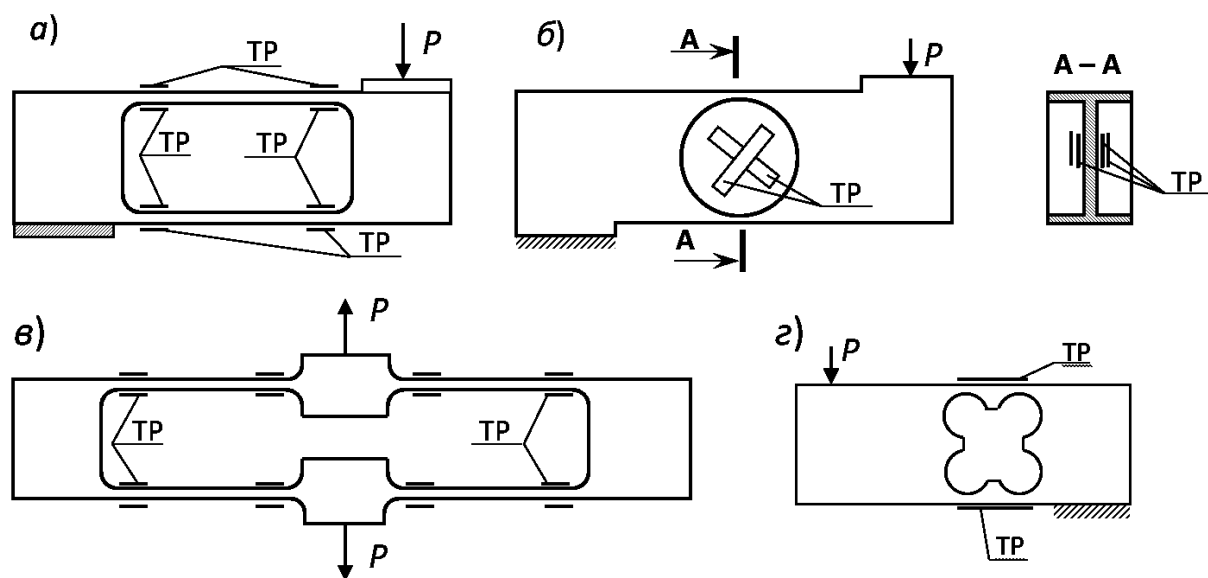


Рис. 1.9. Схемы упругих элементов весов:

а – сдвоенные балочки; *б* – сдвиговой элемент; *в* – счетверенные балочки; *г* – изгибный элемент



Рис. 1.10. Упругие элементы весов

2. По возможности подключения внешнего потребителя информации:

1) с интерфейсом – наличие гнезда штепсельного разъема для подключения:

- к контрольно-кассовой машине;
- к принтеру;
- к серверу;

2) без интерфейса.

3. По источнику электропитания, работающего:

- от сети переменного однофазного тока напряжением $220\text{В} \pm 10\%$, частотой $50\text{ Гц} \pm 5\%$;
- с подключением к сети через адаптер (преобразователь тока);
- от постоянного тока элементов питания (автономное питание),
- от универсальной системы электропитания, позволяющей подключать весы как к переменному, так и постоянному току в зависимости от производственных возможностей.

4. По комплектности:

- только весы;
- весы – принтер;
- весы – касса;
- весы – касса – сканер;
- весы – касса – сканер – компьютер;
- весы с термопечатью этикеток.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ И МОМЕНТОВ СИЛ

2.1. Силы и методы их измерения

Сила – векторная величина, характеризующая механическое воздействие на материальное тело со стороны других тел или полей. Сила полностью определяется, если известны ее значения направления и точка приложения.

Существуют различные виды сил: гравитационные, электромагнитные, реактивные, ядерные, слабого взаимодействия, сила инерции, сила трения и другие. Силы необходимо измерять в широком диапазоне – от 10^{-12} до 10^9 Н (силы удара, тяги).

С малыми силами имеют дело при научных исследованиях, при испытании точных датчиков силы в системах управления и др. Силы от 1 Н до 1 МН характерны для испытательной техники и при определении усилий в транспортных средствах, прокатных станках и другое.

В некоторых областях машиностроения, сталепрокатной и аэрокосмической технике необходимо измерять силы до 50–100 МН. Погрешности измерений силы и моментов при технических измерениях составляют 1–2%.

К измерению силы сводится измерение таких физических величин, как давление, ускорение, масса, погрешность этих величин во многих случаях не должны превышать 0,001%.

Наиболее характерным проявлением силы является ее способность сообщать телу ускорение и деформировать взаимодействующие тела.

Для измерения силы используются в основном следующие методы:

1) метод измерения ускорения тела с известной массой $\bar{F} = m\bar{a}$:

- посредством преобразователя ускорения;
- измерением амплитуды и частоты колебаний.

2) метод сравнения неизвестной силы с силой тяжести $\bar{P} = m\bar{g}$:

- способом создания нагрузки образцовыми гирями;
- использованием гидropередачи и образцовых гирь;
- посредством рычагов и образцовых гирь;
- использованием рычагов и маятника;

3) метод измерения упругой деформации тела, взаимодействующего с неизвестной силой $\bar{F} = c\bar{\xi}$, где c – жесткость упругого тела; $\bar{\xi}$ – упругая деформация:

- с использованием преобразователей относительной деформации;
- с помощью преобразователей линейного перемещения.

- 4) метод сравнения неизвестной силы с силой взаимодействия тока с магнитным полем $\bar{F} = \bar{J} \bar{B} l \sin \alpha$ с использованием электродинамического возбудителя силы.

По *первому* методу, используя способ определения амплитуды и частоты колебаний тела с известной массой, измерение переменной гармонической силы может быть выполнено с высокой точностью, так как измерение массы можно определить с погрешностью, не превышающих нескольких тысячных долей процента. Приблизительно с такой же точностью можно измерить и частоту колебаний. Амплитуду колебаний тела с известной массой можно измерить с погрешностью, не превышающей нескольких десятых долей процента. Указанными погрешностями и будет определяться погрешность измерения силы.

Второй метод измерения силы способом сравнения неизвестной силы с силой тяжести, используют при точных измерениях и воспроизведении статических и квазистатических сил.

Метод непосредственного создания нагрузки образцовыми гирями используется для получения Государственных первичных эталонов единицы силы, воспроизводящих ее с наивысшей точностью.

Метод сравнения с использованием гидropередачи и образцовых гирь, используют для получения образцовых средств измерения силы второго разряда, а также в силоизмерительных устройствах испытательных машин. Для исключения трения в гидropередаче обычно применяют пару «поршень – цилиндр», в которой один из элементов вращается относительно другого.

Метод сравнения посредством рычагов и образцовых гирь используют для создания образцовых средств измерения силы второго разряда, обеспечивающих ее измерение с погрешностью, не превышающей 0,2% измеряемой силы. Этот способ, который обеспечивает измерение силы с погрешностью не более 1% в диапазоне 0,04–1 от верхнего предела силоизмерителя, используют в устройствах измерения силы в испытательных машинах.

Метод сравнения неизвестной силы с силой тяжести с использованием рычагов и маятника применяют также в силоизмерителях испытательных машин.

Все средства для измерения силы, основанные на методах сравнения неизвестной силы с силой тяжести, представляют собой, как правило, стационарные установки. Обычно процесс сравнения сил в таких установках механизирован.

Третий метод измерения силы – способ измерения упругой деформации тела, которое взаимодействует с неизвестной силой, – является самым распространенным методом. Он используется при измерении стати-

ческих и переменных во времени сил, как в стационарных, так и в переносных средствах измерения. Метод используют при создании и поверке образцовых динамометров первого разряда, обеспечивающих передачу единицы силы от Государственного эталона к образцовым средствам второго разряда. Такая передача единицы выполняется с погрешностью, не превышающей 0,1% измеряемой силы. Этот метод используется в рабочих средствах измерения (динамометрах) для измерения как статических, так и переменных сил.

2.2. Общие принципы конструирования динамометров

Динамометры содержат упругий элемент с захватами или опорами (силовводящими элементами) для включения его в силовую цепь. Упругий элемент может быть электрически неактивным, либо электрически активным, то есть является одновременно и чувствительным элементом.

Электрически неактивный упругий элемент выполняет чисто механические функции. Деформация упругого элемента, возникающая при действии на этот элемент измеряемой силы, воспринимается чувствительным элементом (преобразователем). Чувствительным элементом динамометра может являться либо преобразователь деформации, либо преобразователь линейного перемещения. Преобразователь преобразует механическую величину (деформацию или перемещение) в выходной электрический сигнал.

Электрически активный упругий элемент реагирует на созданное измеряемой силой поле механических напряжений или деформаций, изменением своих электрических или магнитных характеристик. К упругим, электрически активным элементам относятся пьезоэлектрические и магнитоупругие преобразователи.

Для достижения оптимальных метрологических характеристик динамометра необходимо соблюдение нескольких принципов.

Принцип цельности конструкции. Для конструкции он заключается в необходимости изготовления упругого элемента из цельного куска материала или с минимальным количеством соединений. Каждое нарушение сплошности упругого элемента, находящегося в силовом потоке, является местом возникновения трения, с которым связаны дополнительные погрешности измерения. При неблагоприятных условиях эти дополнительные погрешности могут достигать большой величины. Если нельзя избежать соединений, то их влияние можно уменьшить за счет максимального удаления соединений от мест установки чувствительных элементов, а также за счет их размещения в местах наименьших деформаций.

Принцип интегрирования. Чем лучше распределен чувствительный элемент преобразователя по поперечному сечению упругого элемента, тем точнее будет динамометр. Для этой цели используют усреднение – инте-

грирование напряжения или деформации упругого элемента. Интегрирование может быть мнимое или действительное.

При мнимом интегрировании обо всем поле напряжений или деформаций судят по величине напряжений или деформаций в одной точке этого поля. При этом предполагают, что внутри ограниченной области упругого элемента существует определенное механическое поле, которое не зависит от точки приложения силы. Это дает возможность использовать один чувствительный элемент. Удаление силовоспринимающих частей упругого элемента от области расположения чувствительного элемента обеспечивает мнимое интегрирование. Конструктивным решением является также ограничение области возможных точек приложения силы.

Конструктивными решениями, обеспечивающими действительное интегрирование, является размещение чувствительных элементов по всей поверхности упругого элемента или по всему объему, или применение непрерывно «распределенного» чувствительного элемента (тензорезисторов, пьезопреобразователей). Суммирующим элементом является измерительная схема соединения необходимого числа тензорезисторов для реализации действительного интегрирования.

Принцип симметрии. Идеальный динамометр реагирует только на изменение измеряемой силы и не откликается на другие воздействия (паразитные нагрузки, условия окружающей среды и другие воздействия). Датчик силы будет иметь хорошие метрологические свойства, если при воздействии измеряемой силы его состояние становится максимально несимметричным, а при других воздействиях остается симметричным. *Симметрия 1-го рода* обеспечивает неизменность положения нулевой точки при воздействии всех окружающих условий. При такой симметрии датчик полностью симметричен при отсутствии измеряемой силы. *Симметрия 2-го рода* обеспечивает симметричное изменение свойств датчика при паразитных нагрузках, то есть нечувствительность к ним. *Симметрия 3-го рода* определяет симметрию изменения свойств преобразователя для другой нагрузки (нечувствительность к этим изменениям).

Принцип оптимальных конструктивных границ. Для любой принципиальной конструктивной схемы преобразователя существуют верхняя и нижняя границы реализуемых номинальных значений силы. Границы типоразмеров измерителей силы определяются следующими факторами: возрастанием погрешности выше заданного значения из-за малых значений деформаций упругого элемента датчика; из-за уменьшения собственной частоты вследствие изменившегося модуля упругости и массы; появлением неприемлемых значений параметров, например, очень большого измерительного хода или очень больших масс; невозможностью изготовления, например, из-за размеров тензорезисторов.

Размеры упругого элемента определяют по наибольшему значению измеряемой силы с учетом допустимой перегрузки исходя из условия $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{пц}}$, где σ_{\max} максимальное нормальное напряжение, возникающее в упругом элементе при действии этой силы; $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности материала упругого элемента. Для достижения высокой точности измерений обычно назначают уровень максимального напряжения 30–60% от предела текучести, при действии номинальной нагрузки.

Форма и размеры упругого элемента определяются диапазоном измеряемых сил, частотным диапазоном измерений, собственной частотой преобразователя, измерительным ходом и другими требованиями. Для изготовления упругих элементов используются легированные стали, бериллиевая бронза и другие материалы. В табл. 2.1 приведены характеристики материалов, используемых для изготовления упругих элементов измерителей силы.

2.3. Общая структурная схема динамометра

Динамометр содержит две группы конструктивных элементов:

- детали непосредственно участвующие в измерении силы;
- детали непосредственно не участвующие в измерении.

Первая группа элементов определяет характеристику датчика (преобразователя) относительно приложенной силы. В первую группу обычно входят:

- преобразователь, включающий суммирующий блок при действительном интегрировании;
- силовводящий элемент с силовоспринимающей поверхностью (рис. 2.1, 2.2);
- распределитель (рис. 2.3), воспринимающий силу от силовводящего элемента и «распределенно» передающий ее на преобразователь;
- селектор (рис. 2.4), выбирающий из приложенных внешних нагрузок измеряемую силу, действующую в направлении измерений, и уменьшающий передачу других составляющих нагрузки на преобразователь;
- противоперегрузочное устройство (рис. 2.5), предотвращающее перегрузки слабых элементов датчика;
- корпус датчика, если он непосредственно участвует в измерении силы.

От второй группы элементов зависят значения посторонних погрешностей, часто они необходимы по технологическим условиям изготовления преобразователя. Такие элементы следует размещать в корпусе датчика.

Таблица 2.1. Характеристики материалов для упругих элементов

Материал	Механические характеристики, МПа					Термообработка		
	Предел прочности	Предел текучести	Предел усталости	Модуль Юнга, $\times 10^{-5}$	Модуль сдвига, $\times 10^{-5}$	Плотность, кг/м ³	Закалка, °С	Отпуск, °С
СТАЛИ								
Углеродистые высокопрочные У8А, У12А	750-1200	—	—	2,00	0,808	7870	767-787	347-417
Углеродистые качественные 65, 70	1000-1050	800-850	350-470	2,10	0,808-0,795	7810	827	477
Кремнистые 60С2, 60С2А	1300-1600	1200-1400	500—	2,05-2,00	0,80-0,87	—	867	457
Марганцовистая 65Г	1000	800	660	2,00	0,82	7810	—	—
Вольфрамо-кремнистая 65С2ВА	1900	1700	—	1,90	0,785	—	847	417
Хромистая 4Х13	1700	1400	—	2,23	0,87	—	1047-1097	197-297
Хромомарганцовисто-кремнистая 30ХГСА, 35ХГСА	1100/1650	850/1400	—	1,98/1,96	—	—	1227	27 (воздух)
Сталь подшипниковая ШХ15	2160	1670	652	2,11	—	7812	860	150 (масло)
Сталь 36НХТЮ	1200	800	—	1,82	—	7800	910	600 (старение)
Хромоникелевая 12Х18Н10Т	550-650	225-315	279	1,98	—	7920	1050-1100 вода	—
СПЛАВЫ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ								
Латуни медно-цинковые Л62, Л68, Л80, Л90	260-640	100-520	—	0,91-1,15	—	8500-8800	Нагартовка	—
Бронза оловянно-фосфорная Бр.ОФ 6,5-0,4	400-750	220-620	—	1,12	—	8700	Нагартовка	—
Бронза бериллиевая Бр.Б2(2,5)	500-1350	300-1280	—	1,17-1,35	—	16600	757-777 После закалки нагартовка	227
СПЛАВЫ НА АЛЮМИНИЕВОЙ ОСНОВЕ								
Дюралюминий Д16АТ	460	320	100	0,68	—	2700	502	старение
ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ								
BT-6	1080	—	—	1,15	—	4450	закалка	отжиг
BT-15	1350-1500	1180	—	1,10	—	4520	—	—
BT-9	1230	—	—	1,18	—	4510	—	отжиг

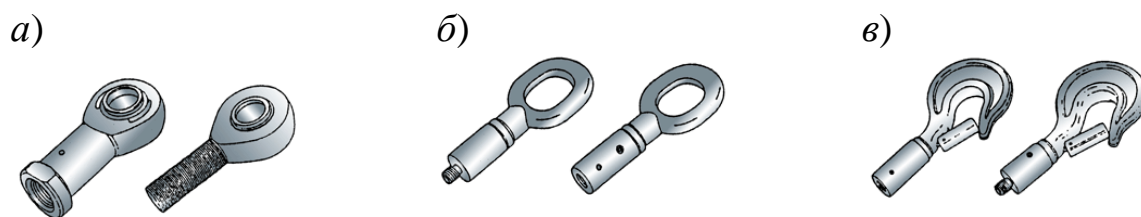


Рис. 2.1. Силowodящие элементы динамометров растяжения с внутренней и наружной резьбой:
a – шаровые, *б* – проушины, *в* – крюки

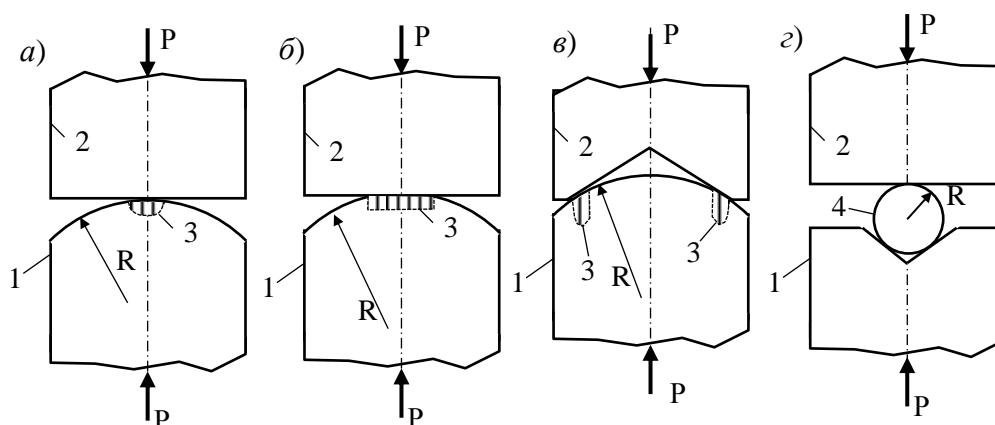


Рис. 2.2. Примеры силowodящих элементов динамометров сжатия:
a – с «твердой» плоской поверхностью (упругое поведение); *б* – с «мягкой» плоской поверхностью; *в* – с внутренним конусом; *г* – с промежуточным шариком;
1 – нижняя поверхность; *2* – верхняя поверхность; *3* – распределение контактных сил; *4* – шарик

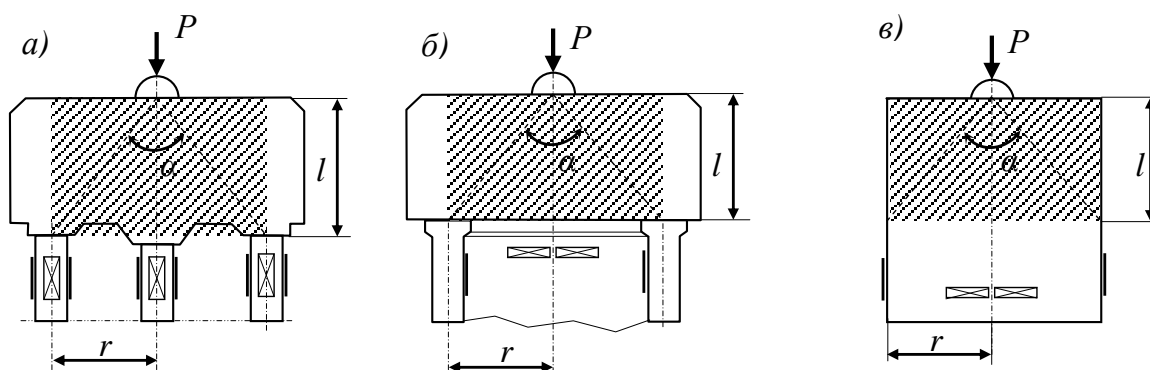


Рис. 2.3. Примеры конструкции распределителей:
a – многостержневой упругий элемент с тенорезисторами; *б* – трубчатый упругий элемент с тенорезисторами; *в* – распределитель и упругий элемент в виде одной детали

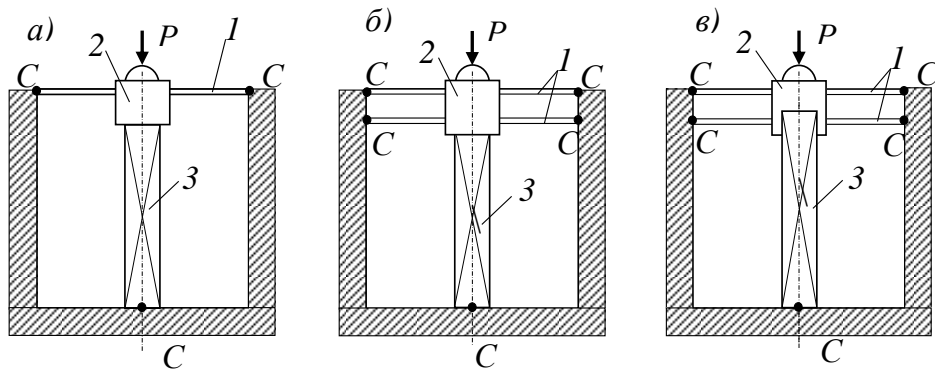


Рис. 2.4. Примеры конструкций селекторов:

a – простейшая мембранная направляющая; *б, в* – двухмембранные направляющие; *1* – мембрана; *2* – распределитель или деталь для связи с преобразователем; *3* – преобразователь; (в точках, обозначенных буквами *C*, детали должны быть связаны между собой с максимальной жесткостью)

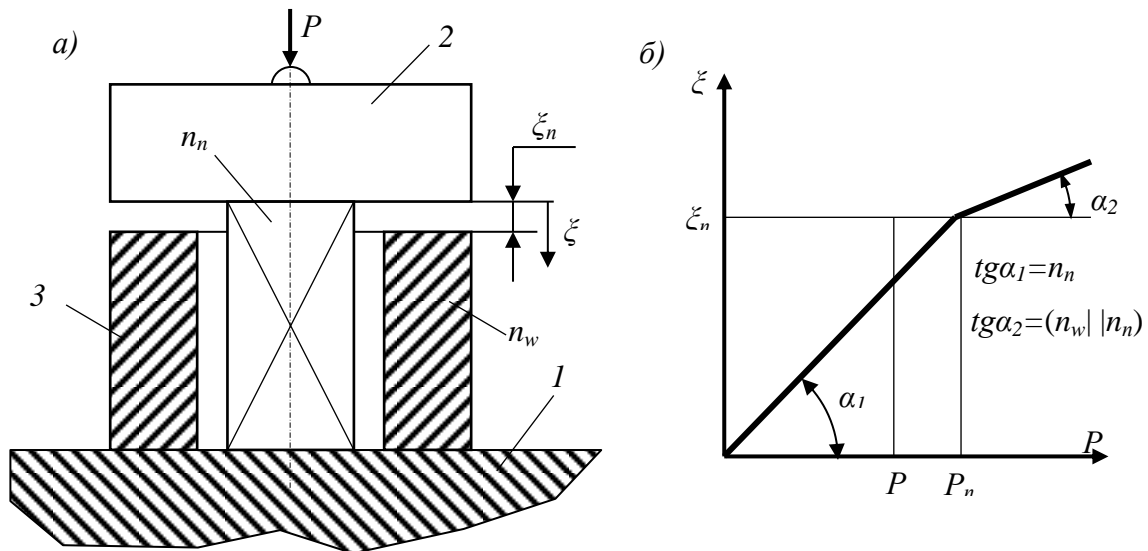


Рис. 2.5. Противоперегрузочное устройство:

a – принципиальная схема; *б* – характеристика жесткости конструкции; *1* – преобразователь с податливостью n_n ; *2* – жесткая упорная плита (одновременно работает как распределитель); *3* – упор с податливостью $n_w \ll n_n$, вступающий в действие, если $\xi = \xi_n$

В отличие от силовых упругих элементов, которые должны обладать хорошими упругими свойствами, к силоизмерительным упругим элементам, или иначе, – упругим чувствительным элементам (УЧЭ) – предъявляются дополнительные требования: малые несовершенства упругих свойств, высокая временная стабильность характеристик и релаксационная стойкость, малое влияние дестабилизирующих факторов (температуры окружающей среды, изменений атмосферного давления), если эти параметры не являются измеряемыми величинами.

Вышеперечисленные требования удовлетворяются за счет правильного выбора материала упругого чувствительного элемента, его геометрической конфигурации и размеров.

2.4. Формы упругих элементов

Продольные упругие элементы (рис. 2.6) пригодны для использования в большинстве типов преобразователей с мнимым и частично действительным интегрированием. К недостаткам относится отсутствие 2-го принципа симметрии. Продольные упругие элементы применяются для измерения нагрузок, величиной более 500 Н. В качестве упругих элементов используются:

- *стержень* (простейшая конструкция, рис. 2.6, а). При достаточной его длине реализуется принцип Сен-Венана и этим автоматически выполняется функция распределителя. Недостатком являются большие деформации при паразитных нагрузках, поэтому стержни обычно используются с селекторами;

- *трубка* (рис. 2.6, б). Объем в области оси симметрии в отличие от стержня свободен, поэтому легко осуществить мнимое интегрирование. Преимуществом является относительно большая жесткость по отношению к паразитным нагрузкам, так как в большинстве случаев нет необходимости в установке селектора. Однако из-за больших силовоспринимающих поверхностей уже на средних требованиях к точности необходимы распределители. По технологическим соображениям распределители не могут быть объединены с упругим элементом, поэтому нельзя реализовать принцип цельности конструкции;

- *сжимаемая плита* (рис. 2.6, в) – соответствует толстому стержню и практически исключает применение распределителей. Удовлетворительные метрологические характеристики получаются тогда, когда можно осуществить действительное интегрирование с помощью установки многих тензорезисторов;

- *параллельные стержни* (рис. 2.6, г) – эта конструкция по свойствам соответствует трубке, но имеет дополнительные недостатки за счет большего влияния паразитных нагрузок, так как отдельные стержни не имеют упругой связи между собой, а также возникают большие трудности при осуществлении равномерного распределения усилий по отдельным стержням. Как правило, требуется большое число чувствительных элементов (тензорезисторов).

Изгибные упругие элементы (рис. 2.7, 2.8) подходят для большинства типов преобразователей с мнимым и действительным интегрированием. К недостаткам можно отнести большие затраты на изготовление, большой номинальный измерительный ход и значительные поперечные

размеры. Этим элементам, как правило, не требуются распределители и всегда осуществима разностная схема. К ним относятся следующие:

- *консольная балка* (рис. 2.7 а, б) является простейшей конструкцией, но не имеет симметрии 3-го рода. Очень чувствительна к перемещениям точки приложения силы;

- *четверенные балки двойного изгиба* («механический мост») (рис. 2.7, в) устраняют указанные недостатки консольной балки при значительно больших затратах на изготовление. Сложно осуществить принцип цельности конструкции;

- *кольцо* (рис. 2.8, а) является разновидностью механического моста, которая позволяет осуществить простым с точки зрения технологии способом принцип цельности конструкции. Однако вследствие сжатия и сдвига в упругом элементе возникает сложное деформированное состояние. Кольцевые элементы применяются, как правило, для измерения нагрузок до 10 Н. Более 5000 Н их использование нецелесообразно;

- *мембрана* обычно имеет круглую форму и применяется для сравнительно больших сил. Ее основной недостаток заключается в большом влиянии заземленного края мембраны.

Скручиваемые и сдвиговые элементы. Для них легко получается разностная схема тензорезисторов;

- *скручиваемый элемент* (рис. 2.8, а) в основном используется для измерения моментов сил. При измерении силы он аналогичен консольной балке, не имеет симметрии 3-го типа и поэтому очень чувствителен к перемещению точки приложения силы;

- *сдвиговый элемент* (рис. 2.8, б) при относительно высоких затратах на изготовление является лучшим для высококачественных датчиков. Нет необходимости в распределителях и селекторах даже при высоких требованиях к точности.

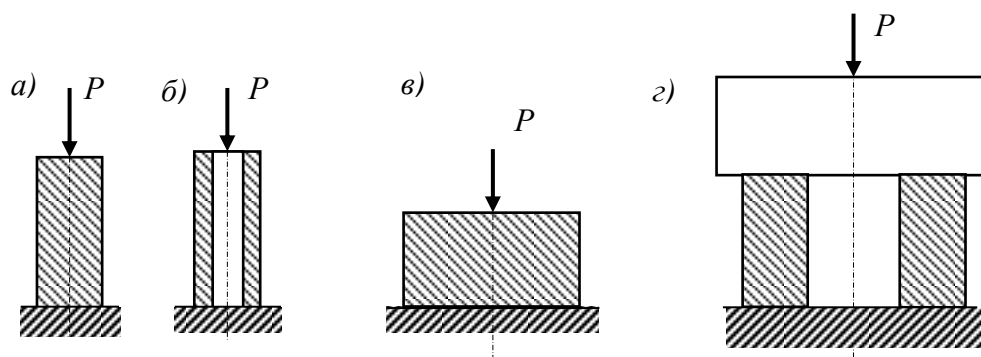


Рис. 2.6. Продольные упругие элементы:

а – стержень; *б* – трубка; *в* – сжимаемая плита; *г* – параллельные стержни

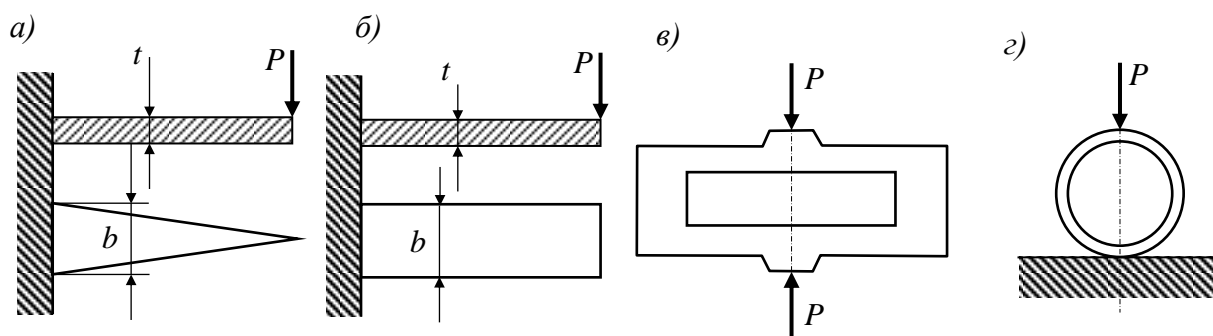


Рис. 2.7. Изгибные элементы: *a* – консольная балка равного сопротивления; *б* – консольная балка постоянного сечения; *в* – счетверенные балки («механический мост»); *г* – кольцевой элемент

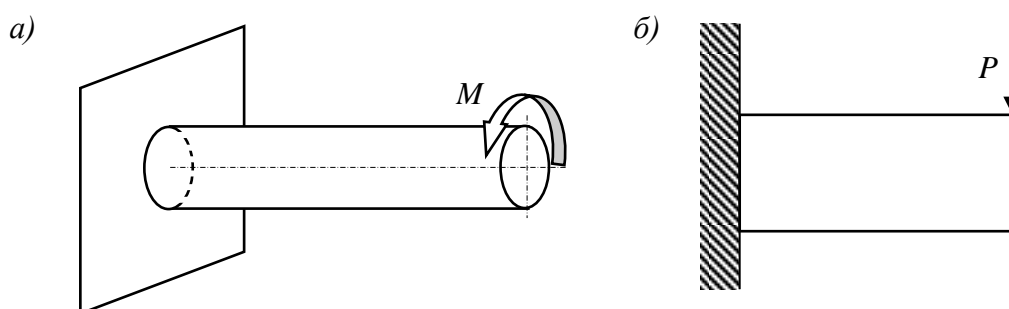


Рис. 2.8. Скручиваемые и сдвиговые элементы: *a* – скручиваемый элемент; *б* – сдвиговый элемент

2.5. Определение размеров поперечного сечения упругого элемента

Напряжение в месте наклейки тензорезистора (ТР) должно обеспечивать высокий сигнал и, следовательно, достаточную чувствительность упругого элемента. В любом другом месте упругого элемента напряжения не должны превышать допускаемых $[\sigma]$ для материала этого элемента. Упругий элемент должен обладать достаточной жесткостью. Обычно задается допустимый измерительный ход силоизмерителя $[\xi]$.

Стержень или трубка. Необходимая площадь поперечного сечения стержня или трубки определяется по выражению

$$F \geq \max \left\{ \frac{P/[\sigma]}{Pl/E[\xi]} \right\}; \quad (2.1)$$

где P – номинальное усилие; E – модуль нормальной упругости. Обозначив через χ отношение площади отверстия F_0 к площади рабочего сечения F , получим для круговой трубки

$$\chi = \frac{F_0}{F} = \frac{1}{(D/d)^2 - 1}. \quad (2.2)$$

Меру затухания паразитного влияния поперечной силы P_n можно определить коэффициентом:

$$k = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} = \frac{\sqrt{1+\chi}}{1+2\chi}, \quad (2.3)$$

где $k_1 = 2\sqrt{\pi} \frac{L}{\sqrt{3}} \frac{P_n}{P}$; ε_n – относительная деформация, вызванная поперечной силой; ε – относительная деформация, вызванная измеряемой силой. Влияние паразитных нагрузок показано на рис. 2.9.

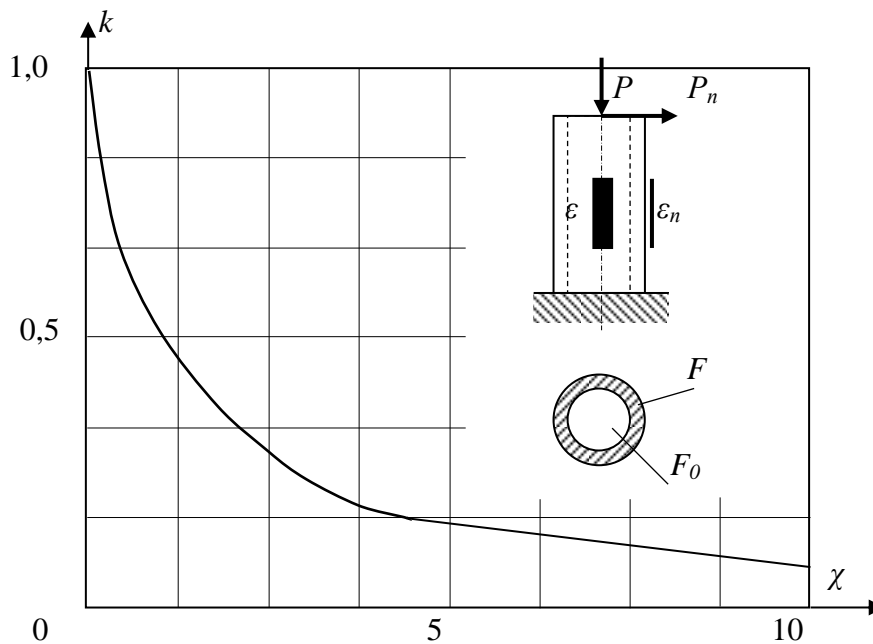


Рис. 2.9. Зависимость паразитной нагрузки от относительных размеров трубки

Упругие элементы консольного типа (рис. 2.10). Первоначально задается ширина балки b , исходя из возможности установки необходимого числа ТР (b_0) с соблюдением условия $b \geq b_0$. Затем определяется отношение l/h по формуле $\frac{l}{h} \leq \sqrt[3]{\frac{bE[\xi]}{4P}}$, где $[\xi]$ – нормированная величина прогиба. Далее определяется толщина балки:

$$h \geq \frac{1,5E[\xi]}{[\sigma]} \left(\frac{h}{l}\right)^2.$$

Отношение $\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} = \frac{P_n h}{6P l}$ является мерой затухания паразитного влияния (рис. 2.11).

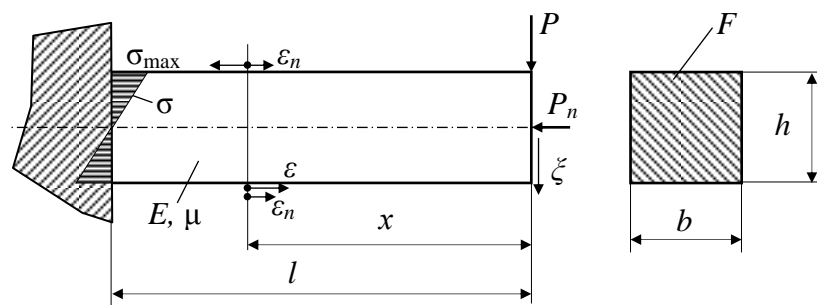


Рис. 2.10. Схема расчета консольной балки

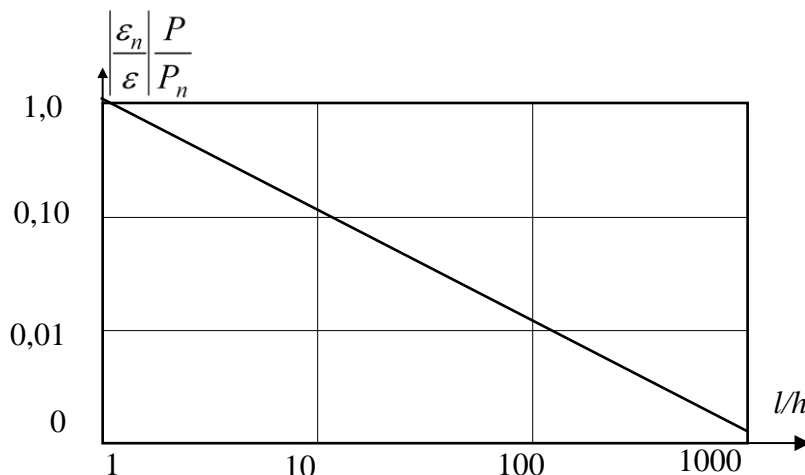


Рис. 2.11. Влияние паразитной нагрузки для консольной балки

Сдвиговые упругие элементы. Соотношение геометрических размеров сдвиговых элементов должно быть таким, чтобы обеспечивалось превышение сдвиговых напряжений над напряжениями от изгиба элемента. Как показано в [4] требуемое поперечное сечение сдвигового элемента приближённо равно удвоенной величине сечения продольного стержня, определяемого по формуле (2.1). Измерительный ход сдвигового элемента приближённо равен

$$h \geq \frac{1,5Pl}{bhG}.$$

Кольцевые элементы. Рассмотрим кольцо малой кривизны без утолщения (рис. 2.12). При $r/h=20$ применение формул прямого бруса приводит к погрешности, не превышающей 4%. Если достаточна погрешность 10%, то использование формул прямого бруса возможно до $r/h=5$. Упругие элементы этого типа применяются для измерения предельных нагрузок в диапазоне от 0,5 до 5 кН. Изгибающие моменты в сечениях A и B определяются как $M_A = 0,3183Pr$, $M_B = -0,1817Pr$, где r – внутренний диаметр кольца.

Изменение диаметра кольца в вертикальном направлении вычисляется по формуле

$$\xi_A = -0,149 \frac{Pr^3}{EI};$$

в горизонтальном направлении по формуле

$$\xi_B = -0,137 \frac{Pr^3}{EI},$$

где I – момент инерции поперечного сечения кольца.

Необходимая толщина сечения кольца при известном значении r/h

$$h \geq \frac{1,07 E[\xi]}{[\sigma](r/h)^2},$$

а ширина поперечного сечения кольца по формуле

$$b \geq \frac{1,79 P[\xi]}{E[\xi]} \left(\frac{r}{h}\right)^3.$$

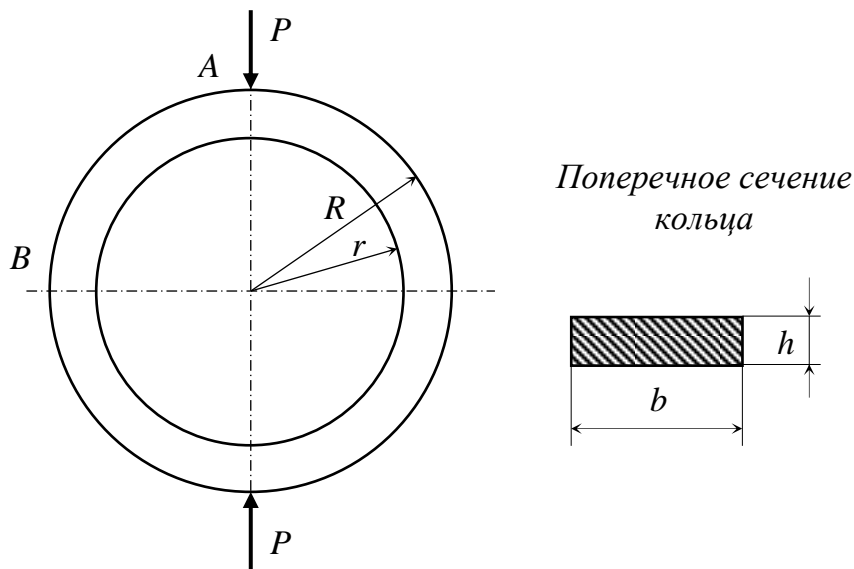


Рис. 2.12. Кольцевой элемент

2.6. Оценка нелинейности упругих элементов

Рассмотрим нелинейность, вызванную только изменением формы тела упругого элемента и смещением точки приложения силы при нагрузке.

Коэффициент нелинейности m , определяющий наибольшую погрешность при наилучшем приближении, и прямая, показанная на рис. 2.13, будет определяться из следующего условия:

$$m = \min \max \geq \left| \frac{f(P) - cP}{cP} \right|$$

в интервале $\lambda P_m < P < P_m$.

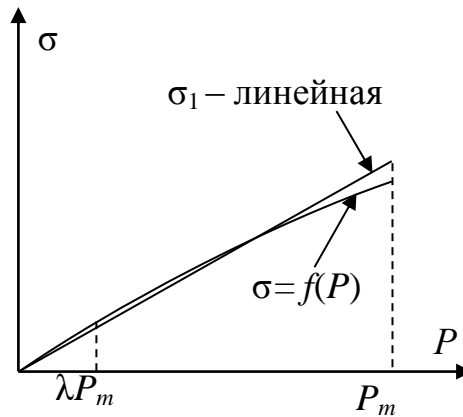


Рис. 2.13. К определению коэффициента нелинейности

На рис. 2.13 обозначены:

- $\sigma = f(P)$ – зависимость между нагрузкой и показаниями прибора;
- $\sigma_1 = cP$ – линейная зависимость (уравнение преобразования прибора);
- λP_m – наименьшее значение нагрузки, начиная с которого допускаются измерения;
- P_m – предельное значение нагрузки.

Коэффициент нелинейности m продольного упругого элемента в виде стержня находится по формуле

$$m = \frac{\mu}{E} (1 - \lambda) \sigma_{0m},$$

где $\sigma_{0m} = \frac{P_m}{F}$ – условное максимальное напряжение при предельном значении силы P_m ; μ – коэффициент Пуассона.

При допустимом нормативном значении коэффициента нелинейности $[m]$ предельное напряжение и предельная нагрузка определяются так:

$$\sigma_{0m} = \frac{E}{\mu(1-\lambda)} [m]; \quad P_m = \frac{E}{\mu F(1-\lambda)} [m].$$

Коэффициент нелинейности консольного упругого элемента:

$$m = 0,3 \left(\frac{\xi_{0m}}{l} \right)^2 (1 + \lambda^2).$$

Коэффициент нелинейности кольцевого элемента:

$$m = 0,628 \frac{P_m}{EF} \left(\frac{r}{h} \right)^2 (1 - \lambda).$$

Многокомпонентные преобразователи представляют обычно довольно сложную комбинацию из простых элементов рассмотренных выше. Расчётные величины коэффициентов преобразования сигнала с тензорезисторов (ТР) при соединении в симметричные мостовые схемы приведены в [12].

3.7. Схемы соединения тензорезисторов

В динамометрах используются в основном мостовые схемы, все ТР которой являются рабочими. В зависимости от вида деформации в упругом элементе динамометра схемы установки и соединения ТР, а также наличие компенсации паразитного сигнала приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Схемы соединения тензорезисторов

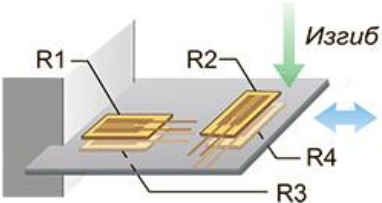
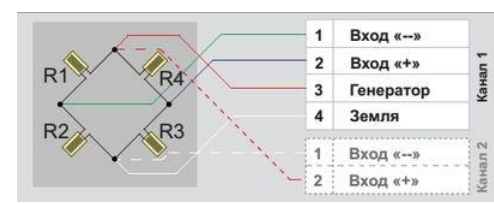
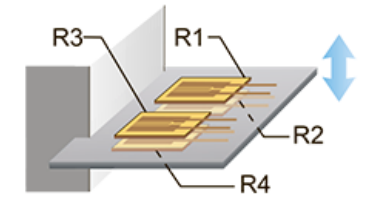
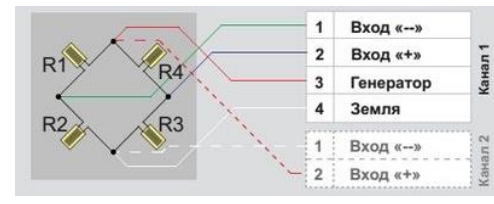
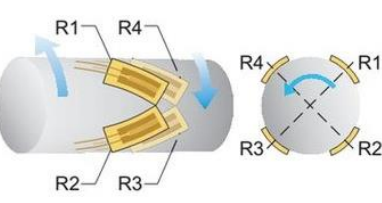
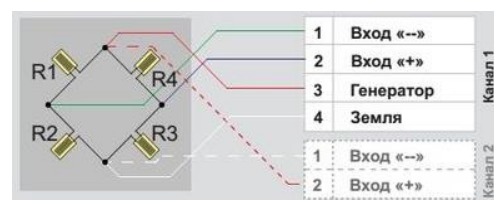
Вид деформации	Схема соединения ТР	Примечание
Одноосевая деформация	Мостовая четырех-(шести-)проводная	4 ТР, $R_4 \approx R_3 \approx R_2 \approx R_1$
		Термокомпенсация есть Компенсация изгиба есть
Деформация изгиба	Мостовая четырех-(шести-)проводная	4 ТР, $R_4 \approx R_3 \approx R_2 \approx R_1$
		Термокомпенсация есть
Деформация кручения (сдвига)	Мостовая четырех-(шести-)проводная	4 ТР, $R_4 \approx R_3 \approx R_2 \approx R_1$
		Термокомпенсация есть

Таблица 2.3. Некоторые образцы выпускаемых производителями динамометров

Динамометры сжатия	Динамометры сжатия и растяжения	Динамометры растяжения	Динамометры растяжения	Динамометры кручения
Схема нагружения				
				
Стержневые	Стержневые	Изгибные консольные	Стержневые	Сдвиговые
				
Мембранные	Сдвиговые	Сдвиговые консольные		
				
		Изгибные двухопорные	Сдвиговые	
				

Таблица 2.4. Область применения динамометров

<p>Датчик силы сжатия Узел встройки Коммутационная коробка VJB-4C Цифровой выход Управляющий выход Аналоговый выход Промышленный усилитель серии WGA</p>	<p>Определение веса резервуаров: При определении веса нескольких резервуаров, а так же вес содержимого каждого из резервуаров, возможна автоматизация и экономия рабочей силы. Например, при дозировании и смешивании химических материалов. Как правило, каждый резервуар оборудован 3-4 датчиками силы, и их выходы объединены в коммутационной коробке</p>
<p>Датчик силы сжатия Коммутационная коробка VJB-4C Промышленный усилитель серии WGA Цифровой выход Аналоговый выход Принтер</p>	<p>Определение веса транспортных средств: Когда транспортное средство помещается на платформу, выходной сигнал от каждого из датчиков силы (обычно, 4 -х) суммируется в распределительной коробке, и в итоге определяется общий вес. При операции тарировки вычитается вес самой платформы, ввиду чего определяется вес нетто транспортного средства</p>
<p>Датчик силы сжатия Сигнал управления лебедкой Лебедка Аналоговый индикатор Цифровой выход Промышленный усилитель серии WGA</p>	<p>Детектор перегрузки для мостового крана: Этот детектор перегрузки используется, чтобы измерить вес груза при подъеме мостовыми кранами. Нагрузка, воздействующая на барабан лебедки, измеряется датчиком силы (одним или двумя) и выводится на индикатор. С использованием индикатора, снабженного релейными выходами, возможно управление лебедкой, например, предотвращать перегрузки при подъеме</p>
<p>Датчик силы на малый диапазон (LTS) Тестируемый материал Дисплей Инструментальный усилитель WGA-710A Самолписец</p>	<p>Измерение коэффициента трения: Датчики силы могут использоваться для определения коэффициента трения. Например, возможно измерение трения покоя</p>

<p>Гидроцилиндр Датчик перемещения DTP-DS Датчик силы сжатия Дисплей Инструментальный усилитель WGA-710A Цифровой выход Самописец</p>	<p>Регулирование нагрузки для стендов при испытаниях конструкций: Датчики силы могут устанавливаться последовательно с гидравлическими цилиндрами, как элемент обратной связи при испытании на прочность всех видов конструкций, включая автомобили, самолеты и суда. Совместная работа датчиков силы с тензометрической аппаратурой, нагружающее усилие может быть измерено и отображено в цифровой форме. При использовании внешнего цифрового индикатора возможен контроль и управление в реальном времени</p>
<p>Гидроцилиндр Датчик силы сжатия Объект запрессовки Объект запрессовки Стартовый сигнал Инструментальный усилитель серии WGA</p>	<p>Устройство измерения усилий запрессовки: У производителей технической продукции существует классическая задача по контролю процесса запрессовки. Эта задача решается путем установки датчиков силы последовательно и датчиков перемещения параллельно изделию. Возможно применение тензометрических приборов с функциональными выходами. Устройство контроля запрессовки может использоваться производителями различных агрегатов и режущего инструмента</p>
<p>От датчика силы на другой стороне Датчик силы сжатия Инструментальный усилитель WGA Контроллер К аналоговому индикатору</p>	<p>Контроль натяжения пленки, проволоки, и т.д.: Устройство применяется для поддержания однородного натяжения рулонных материалов, чтобы управлять процессом натяжения. Суммарное натяжение определяется путем установки датчиков силы на двух концах оси барабана. Также возможно измерение усилий по каждой стороне отдельно</p>
<p>Консольный датчик силы LUB-B LUB-C Коммутационная коробка VJB-4C Инструментальный усилитель серии WGA-710A</p>	<p>Измерение веса животных: Это – устройство, которое позволяет измерить вес животных, не пугая животное. Четыре датчика силы используются для определения веса груза, размещенного на платформе. Весовая платформа располагается на уровне поверхности. Вес отображается на индикаторе. Данные взвешивания могут быть сохранены и распечатаны, с использованием добавочного принтера.</p>

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ

3.1. Измерение линейных размеров

Измерительные приборы и инструменты

При изготовлении деталей машин, агрегатов и других технических устройств используют контрольно-измерительные инструменты. Процесс измерения линейных и угловых размеров деталей заключается в сравнении измеряемой величины с другой однородной величиной, являющейся общепринятой единицей измерения.

Контрольно-измерительные инструменты можно разделить на три основные группы: меры длины, универсальные инструменты, калибры и индикаторы.

Мерами называются инструменты, воспроизводящие единицы измерения или ее кратные значения. Штриховые меры длины – масштабные линейки, складные метры, рулетки – воспроизводят линейные размеры в определенных пределах.

Плоскопараллельные концевые меры длины

Плоскопараллельные концевые меры длины представляют собой набор точных стальных мер в форме прямоугольного параллелепипеда с двумя взаимно параллельными измерительными поверхностями, расстояние между которыми определяет их размер.

С помощью различных приспособлений концевыми мерами можно пользоваться для контроля размера точной детали, шаблона или калибра, установки различных измерительных инструментов и приборов при относительном методе измерения размера, для точной разметки.

Щупы

Щупы (рис. 3.1) представляют собой набор точно обработанных стальных пластинок толщиной от 0,02 до 1 мм и длиной 100 или 200 мм. Щупы применяют для проверки величины зазоров между сопряженными деталями.

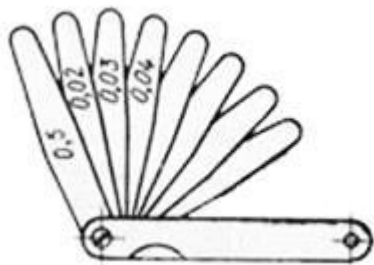


Рис. 3.1. Щупы

Для определения величины зазора пластинки без усилия вводят в зазор поочередно (по одной или по две-три) до тех пор, пока их общая толщина будет соответствовать зазору.

Линейки

Линейка (рис. 3.2) – измерительный инструмент, изготовленный из листовой инструментальной стали. На линейку нано-

сят деления в виде штрихов. Металлические линейки изготавливают со шкалой длиной 100, 150, 200, 300, 500, 750 и 1000 мм.

Складной метр – линейка, состоящая из десяти пластин, соединенных заклепками. Выступы на пластинах обеспечивают устойчивое положение метра в развернутом состоянии.

а)



б)



Рис. 3.2. Линейки:

а – линейка со шкалой 150 мм; б – линейка с верхней шкалой 1 мм и нижней шкалой 0,5 мм (промежуточные риски)

Рулетки

Механическая рулетка (рис. 3.3) – длинная стальная лента с нанесенными на ней делениями. Рулетки с ценой деления 1 мм по всей длине измерительной ленты изготавливают с длиной 1; 2 5; 10; 20; 30 и 50 м.

Лазерная рулетка (рис. 3.3, в) позволяет заметно ускорить измерительный процесс. Существует достаточно много фирм производителей этого инструмента. Предлагаемые модели, как правило, отличаются в основном дальностью замеров (от 15 до 100 и более метров).

Преимуществом является возможность проводить измерения одним человеком, даже в труднодоступных местах, где невозможно работать обычной рулеткой. К минусам можно отнести то, что лазерный луч обязательно должен упираться в какой-то объект.

а)



б)



в)



Рис. 3.3. Общий вид рулетки:

а – рулетка длиной 10 м; б – рулетка длиной 5 м; в – лазерная рулетка дальностью измерения до 40 м

Штангенинструменты

Для более точного измерения линейных размеров применяют штангенциркули, штангенрейсмасы, штангенглубиномеры и др.

К штангенинструментам относятся измерительные инструменты с линейным нониусом: *штангенциркули, штангенрейсмасы и штангенглубиномеры.*

Эти инструменты снабжены линейными шкалами, отсчет по которым производится с помощью дополнительной шкалы – нониуса (используется метод совпадения).

Штангенциркуль механический ШЦ-1 (рис. 3.4, а) широко применяют для измерения наружных и внутренних размеров. Величина отсчета по нониусу 0,1 или 0,05 мм.

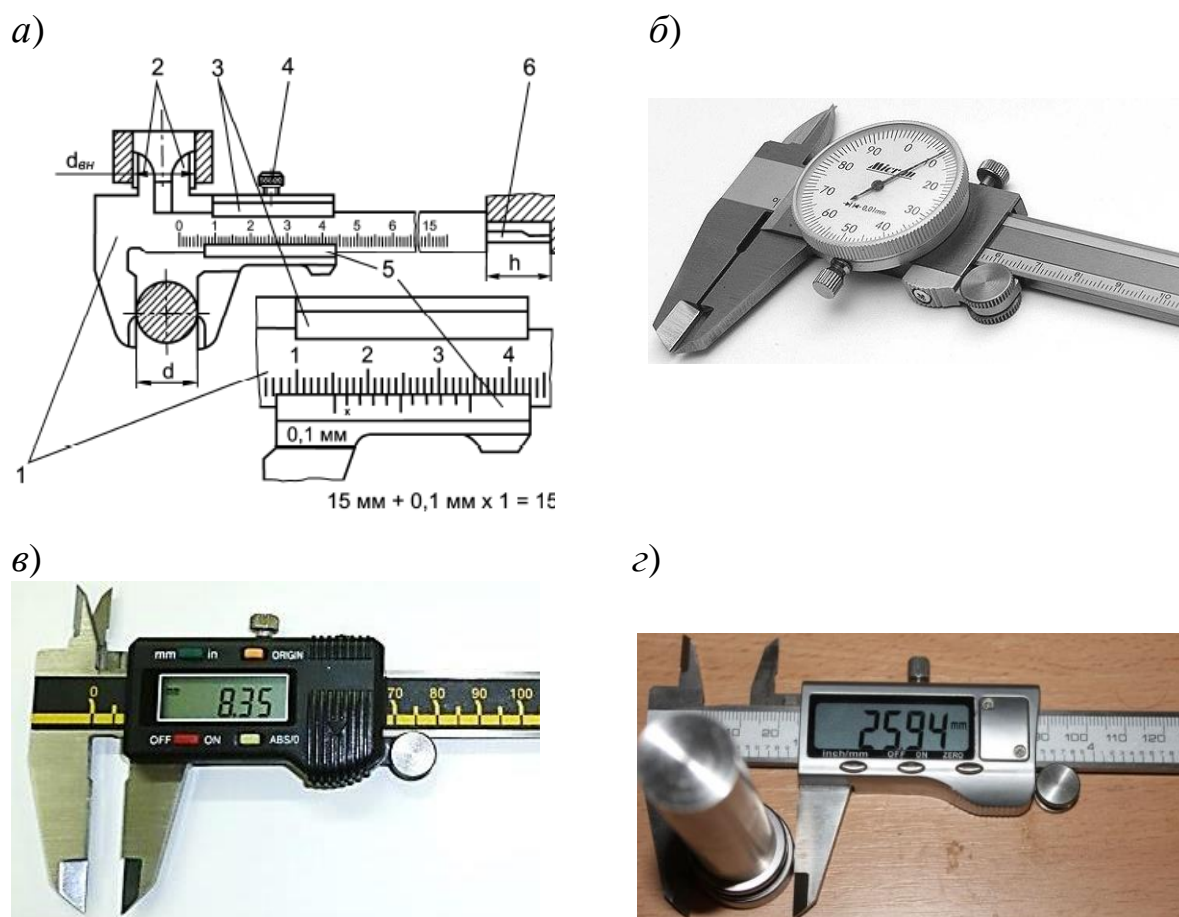


Рис. 3.4. Штангенциркули:

а – конструкция штангенциркуля ШЦ-1: 1 – штанга; 2 – измерительные губки (верхние и нижние); 3 – рамка; 4 – зажим рамки; 5 – нониус; 6 – измерительная линейка; б – общий вид штангенциркуля с циферблатной шкалой (ШЦК с ценой деления 0,01 мм); в, г – штангенциркули цифровые типа ШЦЦ.

Пределы измерений от 0 до 125 мм. Штангенциркуль имеет штангу, на которой нанесена шкала с ценой деления 1 мм. Штанга имеет две измерительные губки (неподвижная и подвижная). По штанге перемещается рамка с подвижными губками. Рамка имеет шкалу, называемую нониусом (рис. 3.4, б, 3.4, в), который позволяет определить при измерении десятые (рис. 3.4, б) или сотые доли миллиметра (рис. 3.4, в). Штанга с обратной стороны имеет паз, в котором установлена линейка глубиномера. Показания определяются визуально по основной шкале, к которым добавляется значение, показываемое нониусом (когда риска нониуса совпадает с одним из делений основной шкалы).

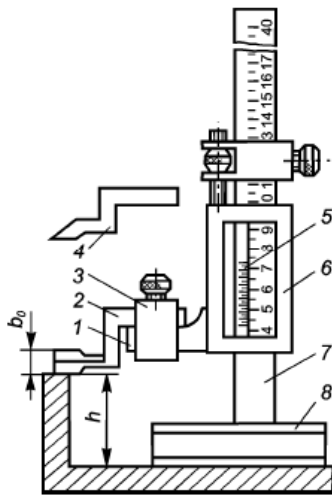
Тип ШЦЦ – современный цифровой штангенциркуль. Отличительными особенностями данного прибора являются: возможность предварительной установки нуля, вывода результатов измерений на внешние устройства через цифровой интерфейс RS-232, возможность вывода показателей как в миллиметрах, так и в дюймах.

Тип ШЦК – штангенциркуль, оборудованный круговой шкалой. Здесь показания штангенциркуля, отвечающие положению губок, считывают при помощи шкалы штанги и по положению стрелки круговой шкалы головки, сцепленной шестеренкой с рейкой штанги. В отличие от отсчета показаний по нониусу, данная конструкция, позволяет считывать результаты измерений быстрее и проще.

Штангенрейсмас (рис. 3.5) является измерительным и разметочным инструментом. Штангенрейсмас механический (рис. 3.5, а) имеет вертикальную линейку 2, закрепленную в массивном основании 1. По линейке перемещается рамка с нониусом 4, закрепляемая на линейке 2 винтом 5. На лапку рамки закрепляют сменную ножку – чертилку 10 имеющую острие 11 из твердосплавной пластины. Движок 6 связан с рамкой микрометрическим винтом 8 и устанавливается на вертикальной линейке стопорным винтом 7.

Циферблатный прибор (ШРК) относится к средствам измерения, работающим по принципу преобразования относительного движения корпуса прибора и рамы к вращению указателя с механизмом реечной передачи. Вместо нониуса используется круговая шкала. Отличается точностью измерений и простотой в использовании. Прибор предназначен для измерения и разметки.

а)



б)



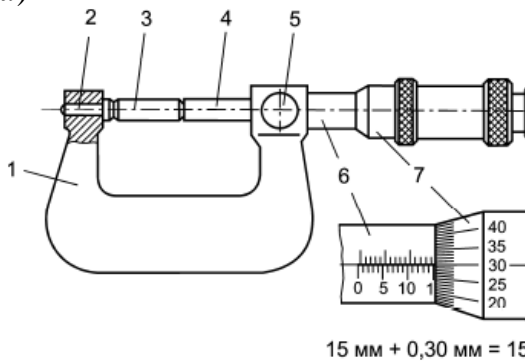
в)



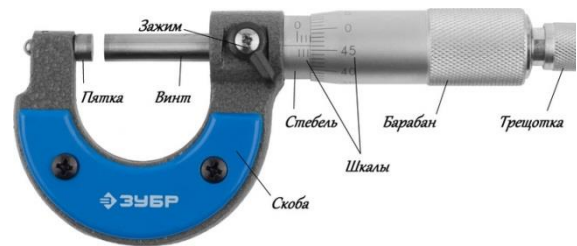
Рис. 3.5. Штангенрейсмас:

а – механический (тип ШР); б – циферблатный (тип ШРК);
в – цифровой (тип ШРЦ): 1 – кронштейн; 2 – измерительная ножка; 3 – хомут;
4 – разметочная ножка; 5 – нониус; 6 – рамка; 7 – штанга; 8 – основание

а)



б)



в)



г)



Рис. 3.6. Типы микрометров:

а – конструкция механического микрометра (тип МК); б – общий вид (тип МК);
в – циферблатный; г – цифровой; 1 – скоба; 2 – пятка; 4 – микрометрический винт;
5 – стопор; 6 – стемель; 7 – барабан; 8 – трещотка (фрикцион)

Микрометры

Для измерения наружных размеров деталей используются механические (рис. 3.6, *а, б, в*), циферблатные (рис. 3.6, *г*) и цифровые (рис. 3.6, *д*) микрометры.

Микрометры (рис. 3.6) предназначены для измерения наружных размеров детали. Микрометр имеет скобу, с одной стороны которой устанавливается неподвижная пятка 2. Вторая сторона скобы имеет сложную конструкцию. Основной измерительный механизм микрометра состоит из гайки 5 и ввинчивающегося в нее шпинделя 3. Шпиндель запрессован в барабан 6. При вращении барабана 6 происходит вращение шпинделя. Для определения точного размера трещотка 7 при вращении передает давление на микрометрический винт и на шпиндель 3. Шпиндель 3, упираясь в поверхность измеряемой детали, остановит вращение барабана 6. Микрометр позволяет измерять размеры с точностью до 10 мкм. Микрометры выпускаются с пределами измерений 0...25, 25...50, 50...75 и т. д. до 275...300 мм.

Процесс измерения наружного диаметра механическим микрометром

Сначала вращаем барабан микрометра до того положения, когда цилиндр (сверло) будет свободно проходить между измерительными поверхностями (пяткой и микрометрическим винтом). Затем зажимаем сверло, при этом барабан вращаем с помощью трещотки. Услышав щелчки, прекращаем вращение трещотки.

Микрометр имеет две шкалы на стебле (неподвижная часть), и одну шкалу на барабане (вращающаяся часть). Нижняя шкала стебля имеет цену деления 1 мм, по ней смотрим, сколько целых миллиметров входит в диаметр сверла. На рис. 3.7, *а* это составляет 4 мм. Далее смотрим на верхнюю шкалу стебля, она показывает значения в 0,5 мм, метки у нее расположены между метками нижней шкалы, чтобы удобнее смотреть значения в полмиллиметра. Результат по двум шкалам получается 4,5 мм (если метку в полмиллиметра не видно, то сразу нужно смотреть показания по барабану).

Затем смотрим полученные значения по шкале барабана (она показывает сотые доли миллиметра). На шкале барабана видим число 17 (это составляет 0,17 мм). Добавляем этот результат к 4,5 мм. Получаем в итоге значение диаметра цилиндра – 4,67 мм (рис. 3.7).

У циферблатного микрометра принцип действия такой же, как и у механического, но пользоваться им гораздо удобнее. Значение измеряемой величины выводится на стрелочный индикатор. Это полезно в случае, когда производятся массовые измерения.

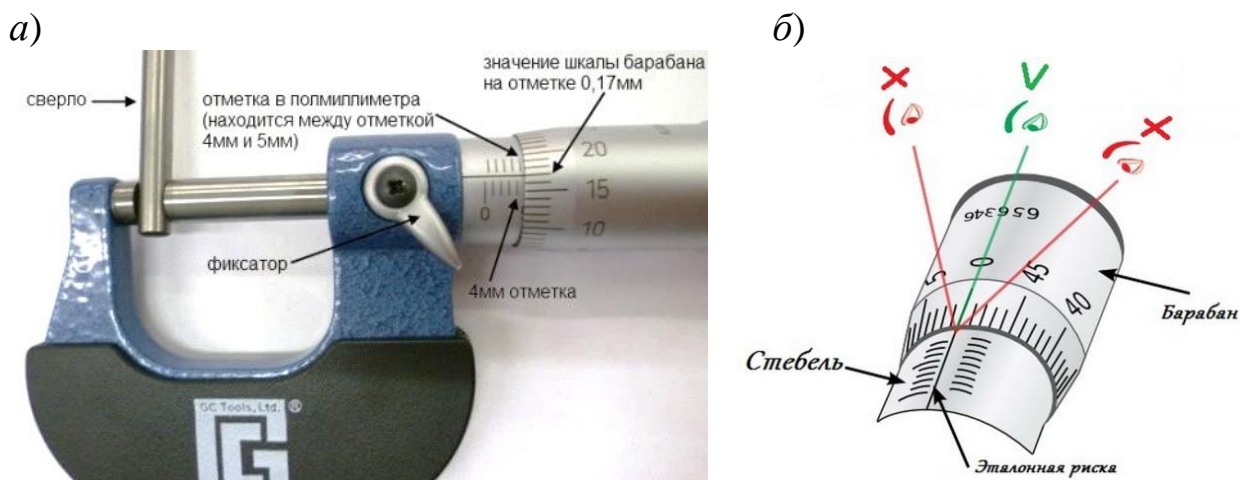


Рис. 3.7. Измерение микрометром диаметра:

a – последовательность измерения; *б* – правильное положение глаза при измерении

Микрометр цифровой предназначен для измерения наружных размеров изделий. Микрометр имеет электронное цифровое отсчетное устройство, которое является более удобным и быстрым при считывании показаний. Также позволяет проводить относительные измерения за счет установки нуля на любом размере в данном диапазоне измерений. Обычные функции электронного блока: кнопочное управление, метрическая и дюймовая система исчисления, кнопка выключения/автоматическое отключение, установка абсолютного нуля, абсолютные и относительные измерения, установка пределов допуска и классифицированное измерение, функция удержания данных на экране, разъем для вывода данных.

Поверочные плиты являются основным средством проверки плоскостности поверхности методом на краску. Плиты изготавливают из высококачественного чугуна марки СЧ 18-36 мелкозернистой структуры, твердостью НВ 170-241.

Поверочные плиты служат не только для контроля плоскостности, но их широко используют в качестве базы для различных контрольных операций с применением универсальных средств измерения.

3.2. Средства контроля и разметки углов

Для проверки или разметки углов применяют: угольники, универсальные и оптические угломеры, плоские угловые плитки, синусные линейки и оптические делительные головки.

Поверочные угольники (рис.3.8, *a*) предназначены для проверки и разметки прямых углов, для контроля взаимно перпендикулярного расположения поверхностей деталей при их изготовлении и сборке.

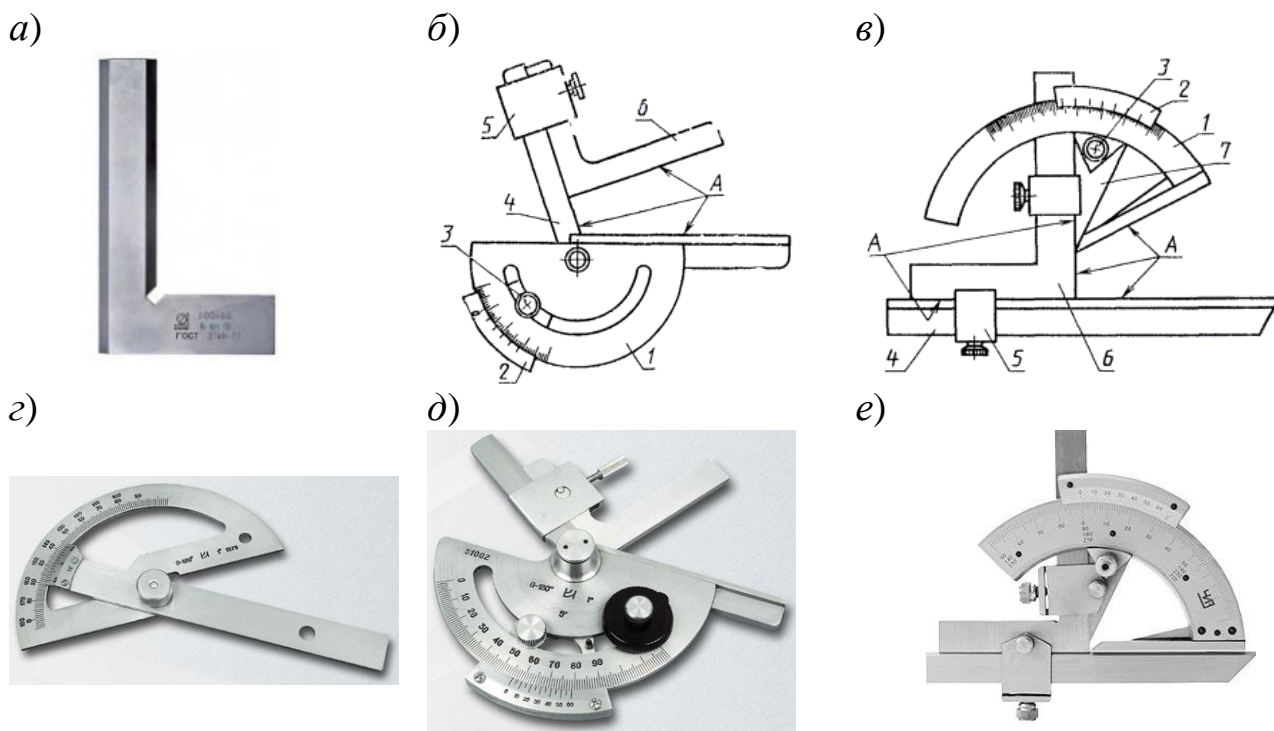


Рис. 3.8. Угломеры механические:

a – угольник; *б* – схема угломера типа УМ; *в* – схема угломера типа УН; *г* – общий вид угломера 4УМ; *д* – общий вид угломера 1УМ; *е* – общий вид угломера УН; 1 – основание (полудиск); 2 – нониус; 3 – стопор; 4 – линейка; 5 – зажим; 6 – угольник; 7 – сектор; 8 – мерительная планка; *A* – измерительные поверхности

Угломеры. Для измерения углов деталей широко используют универсальные механические угломеры с нониусом. Наибольшее распространение получили угломеры типа УМ (рис. 3.8, б, г, д) и типа УН (рис. 3.8, в, е) по ГОСТ 5378-88 и предназначены для измерения наружных углов изделий. Конструкция угломеров позволяет выполнять разметочные работы на плоскости.

Угломер типа 4УМ состоит из основания 1, на которое нанесена шкала углов. На оси основания 1 установлена линейка 4 с нониусом 2, которая закрепляется в требуемом положении стопорной гайкой 3. На угломере 1УМ дополнительно установлен зажим 5 для крепления угольника 6. На угломер типа УН дополнительно установлен сектор 7. Пределы допускаемой основной и абсолютной погрешности угломера 4УМ составляет $\pm 10'$; для модели 2УМ – $\pm 2'$; для модели 5УМ – $\pm 5'$. Угломеры типа УМ позволяют измерять углы в пределах от 0 до 180° .

Более удобен инструментальный угломер УН. Он построен по принципу круговой шкалы и позволяет измерять углы в пределах от 0 до 320° . На дуговом основании 1 угломера, на одном конце которого укреплен мерительная планка 5, нанесены деления шкалы в градусах. По дуге движется сектор 7, на котором укреплен дуговой нониус 2, имеющий деления

нониуса от 0 до 60. К угломеру прилагают угольник 6 и линейку 4 со скошенной мерительной гранью, а также два зажима (хомутика) 5 для крепления угольника и линейки к угломеру.

В собранном виде (с угольником и линейкой) угломером можно измерять углы от 0 до 50°. Если удалить линейку 4 и крепящий ее хомутик 5, то предел измерения углов изменится до величины 140...230°. Если же установить на место угольника мерительную линейку, то измерение углов можно производить в пределах от 50 до 140°. Без угольника и линейки угломер позволяет измерять углы от 230 до 320°. Точность отсчета по нониусу на этом угломере 2 мин.

Более современными являются *цифровые* угломеры. Цифровые угломеры обладают целым рядом преимуществ по сравнению с механическими угломерами.

Угломер-малка с цифровой индикацией обладает точностью выше 0,1° (рис. 3.9, а, б). Угломер имеет цифровой индикатор с крупными цифрами, облегчающим считывание в затемнённых условиях или для людей с ослабленным зрением. Индикатор имеет возможность переворота индикации для удобства считывания информации из разных положений.

Цифровой угломер может использоваться как для удобного и точного копирования угла, так и для точной установки угла для его перенесения на конструкцию.

На производстве чаще всего требуется достаточно высокая точность измерений. С появлением цифровых и лазерных устройств задачи увеличения точности измерений упростились благодаря этим устройствам. Одним из таких невероятно удобных помощников является электронный угломер.

Этот прибор иногда называют электронным транспортиром. Действительно, основное назначение данного устройства заключается в измерении и построении углов. Но от обычных электронных устройств, которые работают с перпендикулярными линиями и плоскостями, угломер отличается тем, что помогает контролировать острые и развёрнутые углы с самыми разными градусами. Он необходим не только на стадии монтажа, так как даёт много возможностей при создании планов и чертежей, а также при проведении диагностики пространственных систем.

Для измерения нужно приложить инструмент к одной стороне (базовой, от которой ведутся расчёты измеряемого угла) и отвести подвижную рабочую планку к другой стороне угла, пока не произойдёт касание без зазоров. При таком движении измерительной планки поворачивается элемент датчика, после остановки прибор вычисляет значение внутреннего или наружного угла и выдаёт числовой показатель на дисплей.



Рис. 3.9. Цифровые угломеры:

а – модель ADA AngleRuler 20; *б* – модель Geo-Fennel Multi Digit Pro; *в*) Модель Leigh; *г* – модель угломера тип 3–5ц Микротех; *д* – модель Bosch GAM 220 MF (процесс измерения); *е* – регистратор модели Geo-Fennel Multi Digit Pro

Многие модели угломеров являются универсальными инструментами, они не ограничиваются своим основным назначением, они также позволяют выносить заранее заданные значения углов в натуру (угол раскрытия инструмента фиксируется и приставляется для очерчивания), измерять уклоны (то есть выполнять функции электронного уровня), давать направление (работают как построители осей). Есть немало других специфических моментов, касающихся практичности и функциональности.

Электронный угломер ADA AngleRuler 20 A00394 питается от батарейки CR 2032 напряжением 3 В. Встроенный датчик обеспечивает точное измерение величины угла. В любом положении плеч есть возможность обнулить счетчик, что позволяет измерять относительные углы без необходимости проведения дополнительных расчетов. Включение модели осуществляется автоматически при разводе плеч. Фиксатор положения плеч гарантирует точное перенесение угла с одной заготовки на другую. Измерительный инструмент пользуется популярностью в сфере построения инженерных чертежей.

Например, для строителей угломер должен быть длиной не менее 400 мм (возможно, с выдвижной рейкой), чтобы можно было его исполь-

зовать для создания разметок. Хорошо, если будут в конструкции и такие элементы, как лазер и уровень. А, например, на производстве удобнее будет лёгкий 25-сантиметровый прибор. Плюсом для них будет наличие на планке разметочной линейки и вырезанного на торце угольника.

Производители иногда указывают несколько данных в градусах. В данном случае речь может идти о точности:

- измерения углов;
- определения уклонов (горизонтального/вертикального уровня);
- расчёта/выставления угла.

Средними считаются показатели в $0,1^\circ$. Высокотехнологичные профессиональные модели не выпадают за погрешность в сотые доли градуса. Кстати, на развёрнутых углах многие инструменты дают удвоенную погрешность (вместо $0,1-0,2$). Естественно, чем меньше максимальные погрешности, тем точнее измеритель углов.

Каждый электронный угломер имеет жёсткие ограничения по работе с большими углами, они обязательно прописаны в инструкции. Есть модели, которые не предназначены для работы с развёрнутыми углами, их планка может стать только в одну линию с корпусом (180°). Иногда этого недостаточно, и очень полезными оказываются устройства, разворачивающиеся на $220^\circ-225^\circ$.

а)



б)



Рис. 3.10. Использование угломеров:

а – измерение угла с помощью модели Bosch GAM 220 MF;

б – измерение угла с моделью SKIL 0580

Цифровой уровень может стрелками указывать направление, в какую сторону следует выравнивать конструкцию.

У цифровых угломеров ЖК-дисплей есть всегда, но их бывает и два – по одному с каждой стороны (облегчает обзор). Имеются угломеры с дополнительной панелью для показаний уровня. Высокотехнологичные модели предлагают специальные опции:

У цифровых угломеров ЖК-дисплей есть всегда, но их бывает и два – по одному с каждой стороны (облегчает обзор). Имеются угломеры с дополнительной панелью для показаний уровня. Высокотехнологичные модели предлагают специальные опции:

- подсветку;
- гравитационный переворот цифр индикации (если измеряете над головой);
- указание сектора измерения (помогает под потолком или в стеснённых условиях быстро понять, какой угол рассчитывается);
- визуальный контроль может дополняться звуковым сигналом.

Цифровые угломеры могут быть оснащены памятью. Сравнение популярных моделей приведено в табл. 3.1

Таблица 3.1. Характеристики популярных моделей угломеров

Марка изделия	Точность измерения (градусы)	Угол измерения (градусы)	Цифровой уровень	Длина рейки, мм	Память
SKIL 0580	0,5	220	нет	320	да
ADA Angle Meter	0,1	180	нет	250	нет
Bosch GAM 220 MF	0,1	220	нет	400	да
Geo-Fennel Multi Digit Pro	0,1	180	да	530	да
ADA Angle Ruler	0,3	360	да	400	–

4. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ

4.1. Тензометрические методы измерения деформаций

4.1.1. Механические и оптические тензометры

Исторически сложилось так, что для измерения деформаций использовались в недалеком прошлом в основном механические и оптические тензометры, которые различались большим разнообразием конструктивных решений. В основе их работы лежит один общий принцип – определение изменения базы (ее длины), ограниченной ножками тензометра.

В конструкции тензометров с механической схемой используется принцип рычага или системы рычагов. Масштаб увеличения и требуемая чувствительность определяют базу прибора. Тензометры применяются при статических измерениях. Наиболее широко был известен *тензометр Гугенбергера*, который широко использовался во многих отраслях техники. Общий вид прибора показан на рис. 4.1.

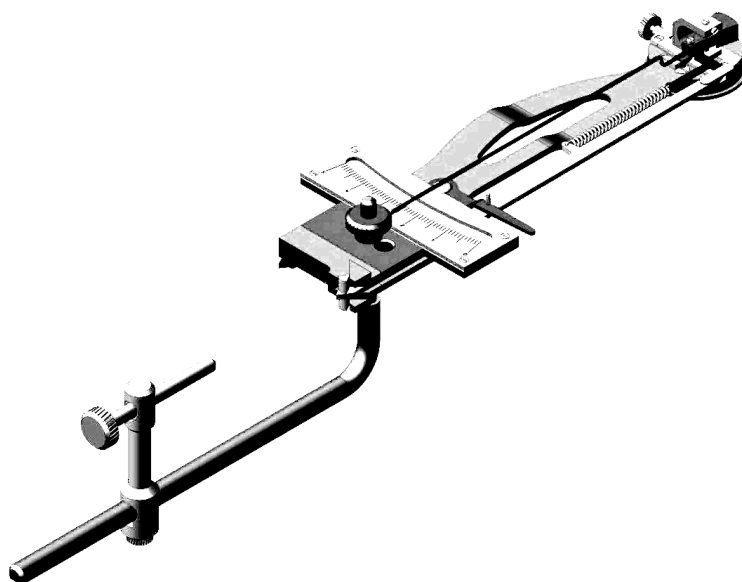


Рис. 4.1. Механический тензометр Гугенбергера

Хорошо зарекомендовали себя тензометры с индикаторами. Принцип их работы заключается в следующем. На исследуемом объекте неподвижно устанавливаются две опоры с отверстиями для цилиндрической штанги. На одной из опор фиксируется жестко пруток (штанга), а на другой опоре закрепляется измерительный индикатор, к подвижному штоку которого крепится второй конец штанги. База такого тензометра составляет обычно 500 или 1000 мм. Деформация исследуемого объекта приводит к изменению расстояния между опорами, это изменение определяется показаниями индикатора. Принципиальные отличия оптических тензометров

от механических заключаются в том, что для увеличения измеряемых деформаций используют световой луч; при этом отсчет можно вести по перемещению светового пятна по шкале тензометра. По такому принципу выполнен *тензомер Мартенса*, широко использовавшийся в недалеком прошлом.

4.1.2. Тензометры сопротивления

Наибольшее распространение для измерения механических деформаций в настоящее время получили проволочные и фольговые датчики сопротивления (тензорезисторы).

В основу работы тензорезистора положена зависимость омического сопротивления R проводника от его длины l , удельного сопротивления ρ и поперечного сечения A :

$$R = \frac{\rho l}{A}. \quad (4.1)$$

Проволочный тензорезистор (рис. 4.2, а) представляет собой металлическую проволоку диаметром 12–30 мкм, уложенную в виде петель (петлевая решетка) на подложку из специальной тонкой бумаги и приклеенную к ней. Концы проволоки припаяны или приварены к ленточным или проволочным выводам из луженой меди. Фольговый тензорезистор (рис. 4.2, б) представляет собой решетку, вытравленную из металлической фольги, толщиной 2–10 мкм, наклеенную на подложку из специальной пленки. Выводы от концов решетки тензорезистора из фольги выполнены аналогично тензорезистору из проволоки. Длина решетки l носит название *базы тензорезистора*. Полупроводниковые тензочувствительные преобразователи представляют собой тонкий брусок, толщиной 20–50 мкм, шириной до 0,5 мм и длиной 2–12 мм, вырезанный из монокристалла полупроводника (рис. 4.2, в) или тонкую пленку, наклеенную на бумажную или лаковую подложку.

Измерение механических деформаций с помощью тензорезисторов производится электрическим методом и основано на явлении зависимости электрического сопротивления металлического проводника от его механической деформации, открытого английским ученым Томпсоном в 1855 году.

Изменение удельного сопротивления проводника под действием растягивающих или сжимающих сил называют *тензорезистивным эффектом*. Он характеризуется тензочувствительностью, которая устанавливает связь между относительным изменением сопротивления и относительной деформацией в направлении измерений.

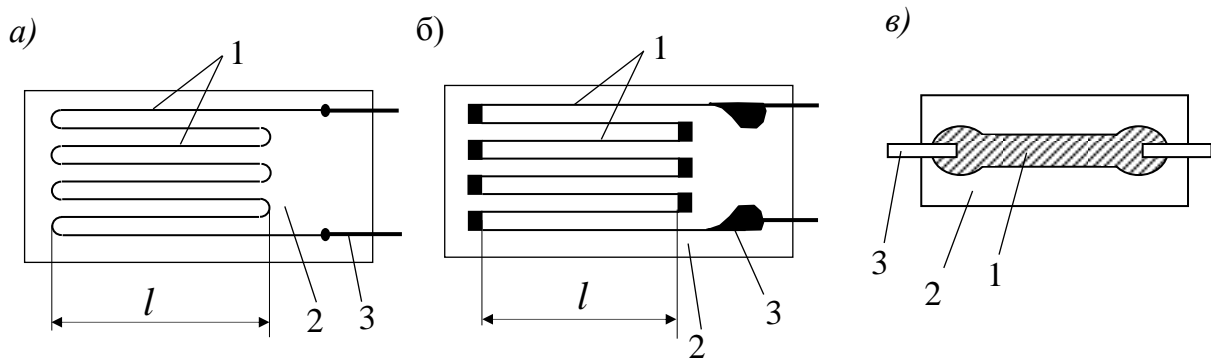


Рис. 4.2. Конструкция тензорезисторов:

a – проволочный тензорезистор; *б* – фольговый тензорезистор;
в – полупроводниковый тензочувствительный преобразователь; *l* – проволочная
или фольговая решетка, монокристаллический полупроводник или пленка;
2 – бумажная или пленочная подложка; 3 – выводы

Коэффициент тензочувствительности тензорезистора равен

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}. \quad (4.1)$$

Для относительных деформаций, не превышающих $5 \cdot 10^{-3}$, с достаточной точностью можно считать, что относительное изменение электрического сопротивления проводника пропорционально его относительной механической деформации, то есть

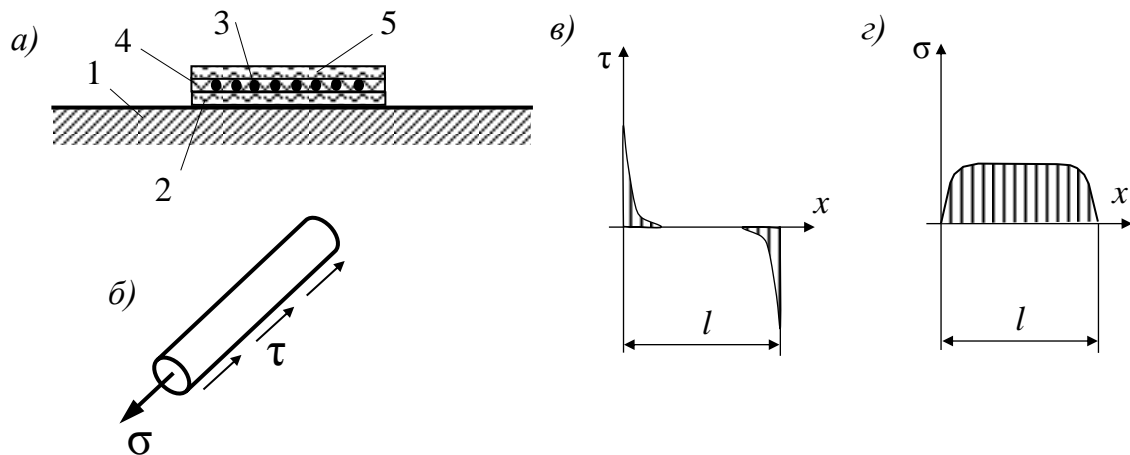


Рис. 4.3. Передача усилий на решетку тензорезистора (ТР):

a – поперечное сечение ТР; 1 – изделие; 2 – подложка; 3 – решетка; 4 – клей;
5 – защитный слой; *б* – усилия, действующие на элемент решетки;
в – распределение касательных напряжений по длине решетки;
г – распределение нормальных напряжений по длине решетки

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} = S\varepsilon, \quad (4.2)$$

где R – электрическое сопротивление недеформированного проводника; ΔR – приращение электрического сопротивления проводника при его деформировании; l – исходная длина проводника; Δl – приращение длины проводника при его деформировании; S – коэффициент тензочувствительности проволоки.

Значение коэффициента тензочувствительности зависит от материала, из которого изготовлена проволока или фольга. Наиболее широко используется сплав высокого электрического сопротивления – константан (60% Cu; 40% Ni), для которого значение S лежит в пределах 1,9 – 2,1. Наивысшее значение коэффициента тензочувствительности из металлических проводников у платины, для которой $S \approx 6,0$. Коэффициент тензочувствительности константановой проволоки не меняется вплоть до разрушения. Чувствительный элемент тензорезистора выполняется в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки или фольги и располагается на подложке, которая электрически изолирует решетку от материала испытуемой детали. Материал основы (подложки) должен обладать хорошими изоляционными свойствами, влагостойкостью, гибкостью, механической прочностью, отсутствием гистерезиса и ползучести. Таким требованиям при нормальной влажности и температуре до 90°C удовлетворяет тонкая, около 0,05 мм, бумага. Кроме бумаги применяют пленки, изготовленные из лаков или полимеризующихся клеев. В настоящее время применяется более широко, чем бумага. Для измерений при температурах до 250°C в качестве основы применяют специальную жаростойкую бумагу, пропитанную термостойким клеем. При температурах 400 ... 800°C решетка закрепляется с помощью специального жаропрочного цемента на фольге из нержавеющей стали. Тензорезисторы с основой из стали соединяются с объектом точечной сваркой.

Одной из основных характеристик тензорезистора является его база l (рис. 4.2). По длине базы l тензорезисторы условно можно разделить на три группы: с малой при $l < 6$ мм, средней $l = 10 \dots 30$ мм и большой $l > 30$ мм базами. Наибольшее распространение получили тензорезисторы с базой 1 ... 20 мм. В практике тензометрирования приняты сопротивления тензорезисторов 50, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400 и 600 Ом.

Фольговый тензорезистор. В настоящее время они получили наибольшее распространение в практике их использования. Фольговые тензорезисторы, по сравнению проволочными петлевыми, имеют лучшие метрологические характеристики, и позволяют создавать тензорезисторы с любой конфигурацией чувствительной решетки. Благодаря большой

площади контакта с исследуемой деталью (из-за плоской части проводника решетки по сравнению с круглым проводником) тензорезистор хорошо рассеивает тепло, что позволяет увеличить питающий ток, повысить чувствительность мостовой схемы, расширить диапазон рабочих температур, улучшить передачу деформации от детали. Фольговые тензорезисторы имеют малую чувствительность в направлении поперек решетки, так как по краям решетки предусмотрены более широкие участки проводника, которые имеют относительно малое сопротивление. В качестве основы используется пленка из синтетической смолы. Фольговые тензорезисторы изготавливаются с базами от 0,2 мм и более. Процесс производства отличается высокой точностью. Чувствительный элемент изготавливается методом травления из тонкой металлической фольги.

Тензорезисторы типа КФ отечественного производства *SmS sensor*, «ВЕДА» (Россия) имеют маркировку, приведенную на схеме рис. 4.4.

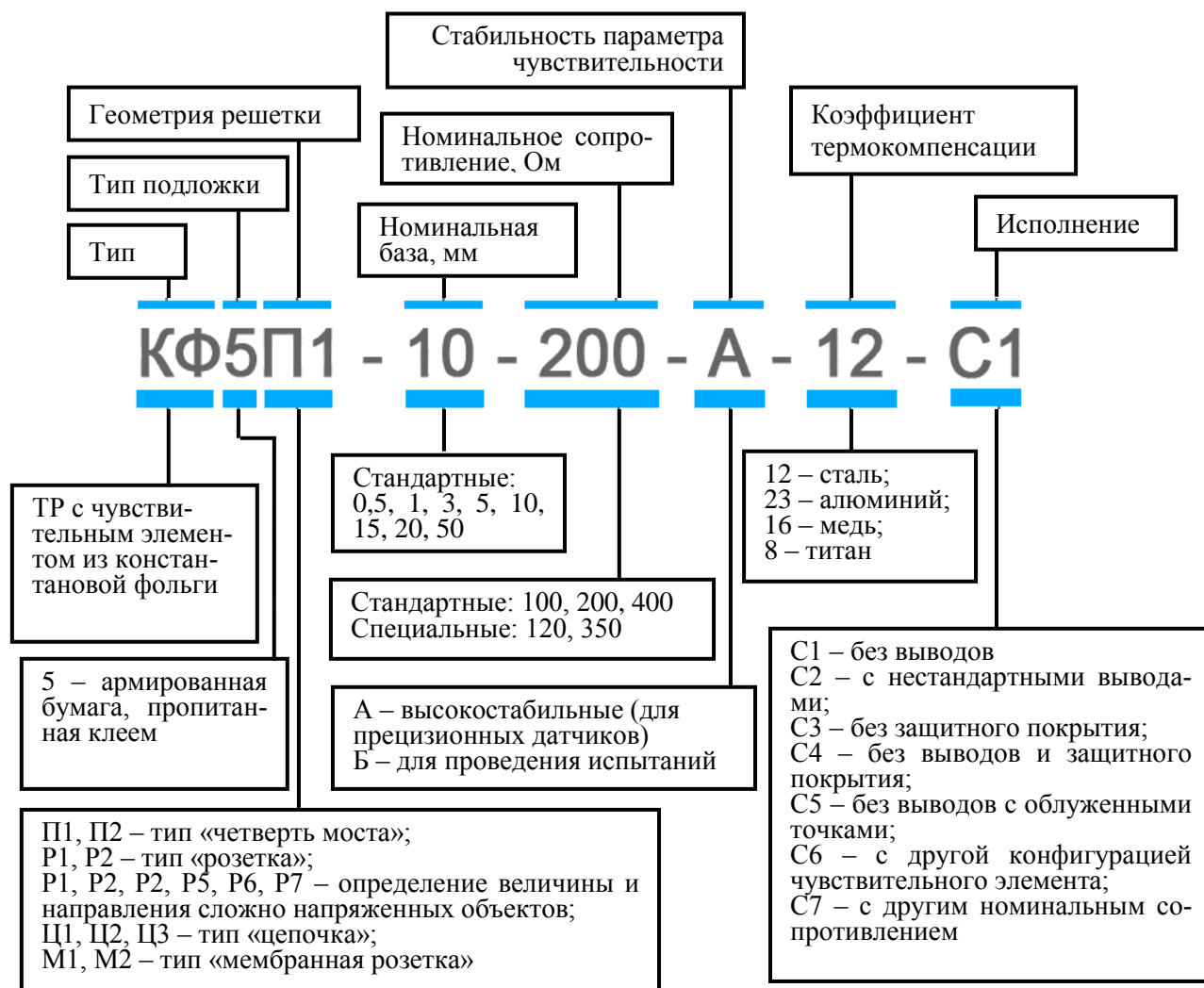


Рис. 4.4. Маркировка тензорезисторов «Веда»



Рис. 4.5. Схема условного обозначения ТР (ГОСТ 21616-91)

Схема условного обозначения в соответствии с ГОСТ 21616-91 следующая (рис. 4.5):

- 1 – цифровой и/или буквенный код, выбранный разработчиком для обозначения конкретного типа тензорезистора (ТР);
- 2 – номинальная база ТР, мм;
- 3 – номинальное сопротивление ТР, Ом;
- 4 – группа показателей (например А, Б или В);
- 5 – температурный коэффициент линейного расширения материала без множителя 10^{-6} при установке на который ТР является термокомпенсированным, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (для нетермокомпенсированных данная позиция не заполняется).

Пример условного обозначения ТР типа КФ5П1 с базой 10 мм, номинальным сопротивлением 200 Ом, группы показателей А, термокомпенсированного для материала с температурным коэффициентом линейного расширения $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$: КФ5П1-10-200 А-12.

На рис. 4.6 приведена маркировка ТР *BF* фирмы *SmS sensor*.

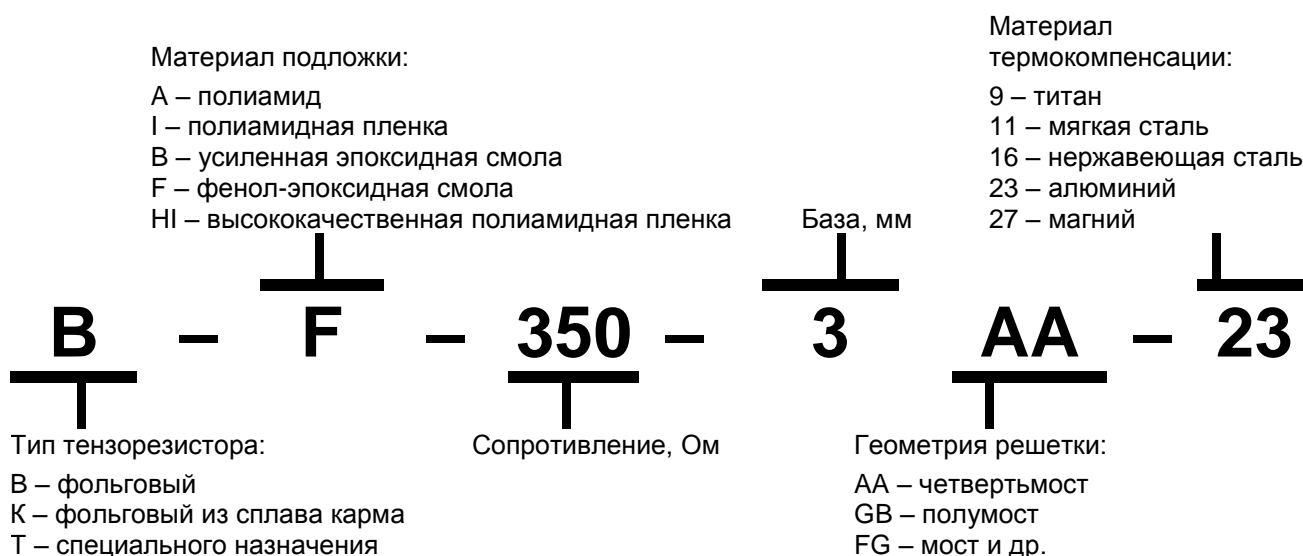


Рис. 4.6. Схема условного обозначения ТР *SmS sensor*

Обозначение типов тензорезисторов фирмы *HBM* приведено на схеме рис. 4.7.

1- L Y 1 1 - 3 / 120 A

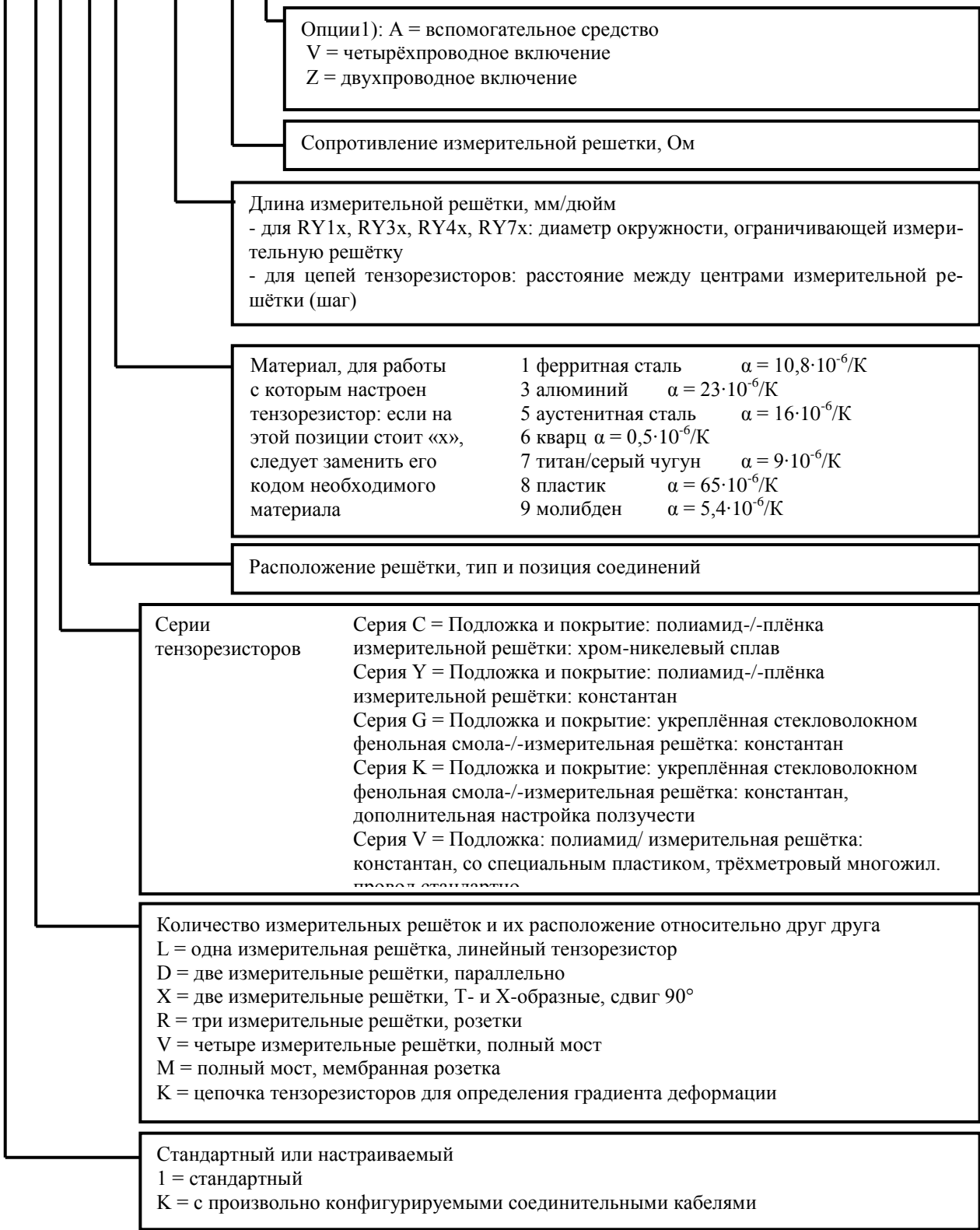


Рис. 4.7. Обозначение типов тензорезисторов фирмы HBM (Германия)

Общий вид некоторых видов тензорезисторов различной конструкции и назначения приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Некоторые виды тензорезисторов

Тензорезисторы компании «ВЕДА» Россия					
Тензорезистор тип П1	Тензорезистор тип П2	Тензорезистор Розетка Р1	Тензорезистор Розетка Р2	Тензорезистор Розетка Р3	Тензорезистор Мембрана М
Тензорезистор Цепочка Ц1		Тензорезистор Цепочка Ц2		Тензорезистор Цепочка Ц3	
Тензорезисторы компании HBM Германия					
XY5x	RY5x				20
Тензорезисторы XY/RY для анализа остаточного напряжения			XY2 – ТР сдвига	Миниатюрная розетка RF9	RDS 20 - для определения распространения трещин
XY2 двойная розетка	RY5 тройная розетка	RY2 тройная розетка	Решетка - константан	Решетка Ø 5 мм - константан	
метод кольцевого разреза		метод высверливания отверстия	Подложка – полиамид	Подложка полимер термопластик 18 мкм;	
—	—	—	Сопротивление 120, 350, 700 Ом	Сопротивление 120 Ом	—
Тензорезисторы компании KYOWA Япония					
				 KFG-1.5-120-C20-11 KFG-3-120-C20-11	
Двухосевые KFG-5-120-D16-11	Трехосевые KFG-5-120-D17-11	Трехосевые KFG-2-120-D4-11	ТР для измерения аксиального напряжения в болтах		Одноосевые KFR-02N-120-C1-11
 KFG-1-120-D39-11	 KFG-2-120-D9-11	 KFG-3-120-D28-11	 KFR-1-120-C1-11		
«Цепочка»	«Цепочка»	для измерения остаточного напряжения	С малой базой, одноосевые	KV 25V - для определения распространения трещин	

4.1.3. Полупроводниковые тензорезисторы

Монокристаллический полупроводник, вырезанный из монокристалла, толщиной 20–50 мкм, шириной до 0,5 мм и длиной 2–12 мм используется в качестве чувствительного элемента тензорезистора. Наибольшее распространение для изготовления тензорезисторов из полупроводниковых материалов получили германий и кремний. Больше распространение получил кремний, вследствие его меньшей чувствительности к температуре. В качестве полупроводниковых тензорезисторов применяются игольчатые кристаллы, полученные выращиванием из газовой фазы, эпитаксиальные пленки и дендриды. Интерес представляют полупроводниковые тензорезисторы из дендритной ленты германия, получившие широкое распространение вследствие простой и доступной технологии изготовления. Дендритами принято называть древовидные, игольчатые или пластинчатые кристаллы сложного двойникового строения, образующиеся при кристаллизации в переохлажденном расплаве или из пересыщенной газовой фазы.

Дендритные тензорезисторы из германия отличаются пониженной механической прочностью по сравнению с тензорезисторами, полученными из монокристаллического слитка. Достоинством дендритных тензорезисторов по сравнению с другими полупроводниковыми тензорезисторами, является простота изготовления и относительная дешевизна. Изготовление германиевого дендритного тензорезистора (гедистора) не требует специальной аппаратуры (например, станков для шлифовки и резки). Для изготовления тензорезисторов используется германиевая дендритная лента в основном с удельным сопротивлением $\rho = 1 \pm 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Параметры таких тензорезисторов сильно зависят от температуры.

Тензорезисторы, полученные выращиванием из газовой фазы, представляют собой монокристаллические иглы диаметром 10–100 мкм.

Значение коэффициента тензочувствительности сильно зависит от материала, из которого изготавливается тензорезистор, от количества примесей и типа (p - или n -тип) проводимости и изменяется от -100 до $+200$ и выше.

Кремнистор – полупроводниковый тензорезистор на основе нитевидных монокристаллов кремния с величиной допустимой продольной деформации до $0,8\text{--}1\%$; характеризуется очень высокой стабильностью: до $0,002\%$ на протяжении 2 лет.

SmS тензорезистор – это полупроводниковый датчик деформаций, чувствительным элементом которого является поликристаллическая пленка моносulfида самария. Они отличаются высокой чувствительностью к деформации, малой величиной ТКС, линейностью выходного сигнала.

ла и др. Ввиду физических особенностей тензочувствительного материала данный тип тензорезисторов совмещает в себе стабильность работы металлических тензорезисторов и высокую чувствительность кремниевых.

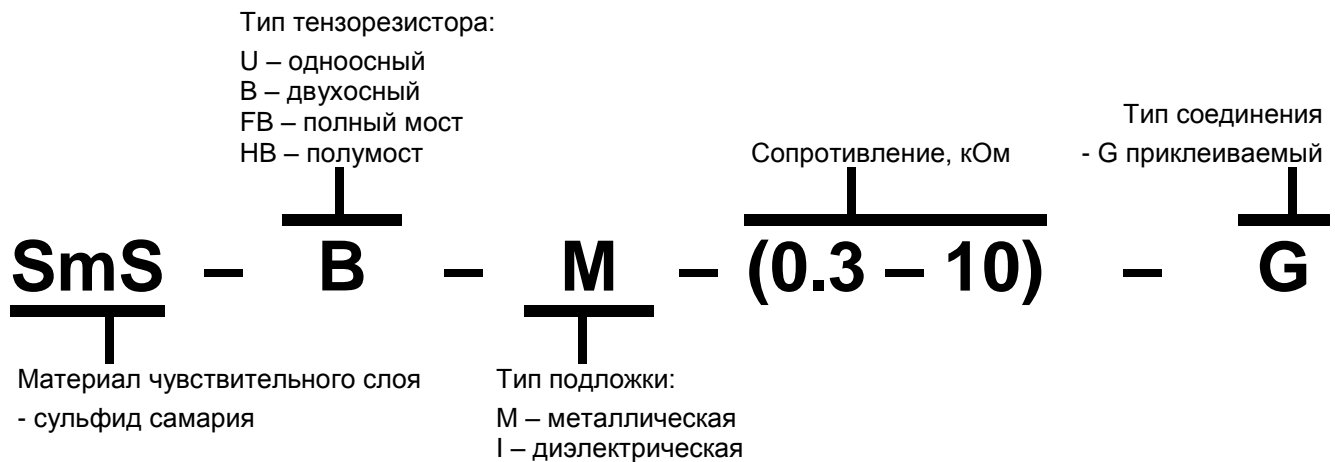


Рис. 4.8. Структура обозначения полупроводниковых ТР типа SmS

Общий вид некоторых видов полупроводниковых тензорезисторов различной конструкции и назначения приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Полупроводниковые тензорезисторы

	 Тип NU-101C	 Тип SmS-B-M-350-G	 KSPB-1-350-E4
Россия	SmS sensor Россия	SmS sensor Россия	KYOWA Япония
Гедистор ГДТ p-типа	Кремниевый ТР NU-101C	Тензорезистор на сульфиде самария	KSPB-1-350-E4 Кремний p-тип
—	База 5 мм коэффициент тензочувствительности 80 Диапазон температур ≤80°C	База 5 мм коэффициент тензочувствительности 30...50 Диапазон температур -70...+180°C	База 1 мм коэффициент тензочувствительности ≈150 Диапазон температур -50...+120°C
—	Сопротивление 15 ; 30 ; 60 ; 120 ; 350 ; 1000 Ом	Сопротивление 350, 500, 700, 1000, 3000 Ом	Сопротивление 350 Ом

Клеи для крепления ТР

Тензопреобразователи (тензорезисторы) закрепляются с помощью клея на поверхности изделия. Наличие петли у проволочного тензорези-

стора, воспринимающей деформацию перпендикулярного направления по отношению к основной деформации, а также двух клеевых прослоек и подложки приводит к снижению коэффициента тензочувствительности преобразователя по сравнению с проволокой или фольгой. Его величина существенно зависит от механических свойств клея и качества наклейки. Снижение коэффициента тензочувствительности преобразователя не превышает 2–3 %.

Клеи (как связующее), применяемые для закрепления тензорезисторов на исследуемой поверхности, должны отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечивать передачу деформации исследуемой поверхности к ТР и обладать малой ползучестью показаний в рабочем диапазоне температур и деформаций. Ползучесть обусловлена пластичностью клея;
- обеспечивать электроизоляцию тензорезистора от исследуемой поверхности. Как правило, поставщики тензорезисторов приводят в документации список клеев с оптимальными характеристиками для данного типа тензорезисторов и описание технологии их применения.

Наиболее часто используемые в тензометрии клеи для фольговых тензорезисторов:

- клей циакрин ЭО. Это клеи холодного отверждения, быстросхватывающиеся. Применяются для склеивания непористых материалов и металлов. Без применения усилий сжатия твердеет в течение 48 часов. Рабочий диапазон температур $-80 \dots +80^{\circ}\text{C}$.
- клей УВС-10Т. Горячего отверждения, однокомпонентный. Соединяет неметаллические непористые материалы и металлы. Рабочий диапазон температур $-70 \dots +200^{\circ}\text{C}$. Полимеризация (отверждение) клея осуществляется следующим образом: приклеенные тензорезисторы выдерживать 0,5 часа при нормальных условиях. Далее выдержать 5 ч при температуре 180°C с давлением прижатия 0,1–0,3 МПа (1–3 атм) в условиях термошкафа. Затем при температуре 215°C в условиях открытой полимеризации выдержать 5 ч.
- клей БФР-2К. Относится к однокомпонентным клеям горячего отверждения, фенолформальдегидный. Условия полимеризации, технология использования аналогичны клею УВС-10Т.

Кроме того, например, наиболее часто рекомендуют клеи циакрин ЭО для тензорезисторов 2ФКПА, 2ФКПД, ФК-ПА и др. Для тензорезисторов 1ФКТК и 2ФКТК клеи БФ-2, ВЛ-9. Лак ВЛ-931 для тензорезисторов 2ФКНА, 2ФКПД, 2ФКРБ и др.

В табл. 4.3 представлены характеристики некоторых других клеев.

Различные производственные факторы приводят к разбросу начальных сопротивлений и коэффициента тензочувствительности тензорезисторов. Поэтому, после изготовления тензорезисторы сортируются в партии по значению начального электрического сопротивления. Разброс по сопротивлению в партии допустим в пределах 1%.

Таблица 4.3. Характеристики некоторых клеев для тензорезисторов

$t, ^\circ\text{C}$	Отверждение	Тип клеев	Марки клеев	
			Отечественные	зарубежные
До 60-100	Холодное	Нитроцеллюлозные	Целлулоидный 192Т и др.	SR-4, Дуко, BC-11, и др.
		Цианакрилатные	Циакрин	Истман 910, Арон-Альфа, JA-1 и др.
		Эпоксидные	ВК-9	ЕРУ-150, Аральдит, JA-5, RTC Z-70 и др.
	Горячее	Фенолоформалегидно-поливинилацеталевые	БФ-2, БФ-4, ВЛ-931, ВЛ-6	—
		Фенолкаучуковые	ВК-13, ВК-13М	—
До 200	Холодное	Эпоксидные	ВК-9	—
		Полиакрилатные	Ф-1, Ф-2	РС-12, Р-2
		Фенолформальдегидные	—	Бакелит, BC-3065, РС-6
	Горячее	Фенолкаучуковые	ВК-32-2, ВК-32-200	—
		Эпоксидные	—	ЕРУ-350, ЕРУ-400, Митра 200
До 300	Холодное	Полиамидные	U-18, ПИР-2	-
	Горячее	Полиамидные	СП-3	PLD-700
		Эпоксидные	—	М-600, М-610
		Фенолтитанокремнийорганические	ТКФ-4	—
		Полибензимидазольный	ПБИ-1	—

От партии датчиков (тензорезисторов), которую предполагается использовать для замеров, отбирается около 5% от их числа для определения их коэффициента тензочувствительности. Отобранные датчики наклеиваются на тарировочную балку, изготавливаемую из того же материала, из которого изготовлено изделие. Вместо определения коэффициента тензочувствительности на практике чаще выполняют градуирование измерительного прибора или всей измерительной цепи в единицах относитель-

ной деформации или непосредственно в напряжениях для одноосного напряженного состояния.

Схемы соединения ТР

Наиболее известной измерительной схемой, позволяющей с высокой точностью определять изменение сопротивлений, является *мост Уитстона* (рис. 4.9). Он состоит из четырех последовательно соединенных сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , источника питания и измерителя. К одной диагонали моста подключается источник питания постоянного или переменного тока, к другой – регистрирующий прибор. Мост Уитстона обычно изображается в виде ромба, стороны которого называются *плечами*. Плечо моста может состоять из одного или нескольких сопротивлений, соединенных различными способами (последовательно, параллельно, смешанно).

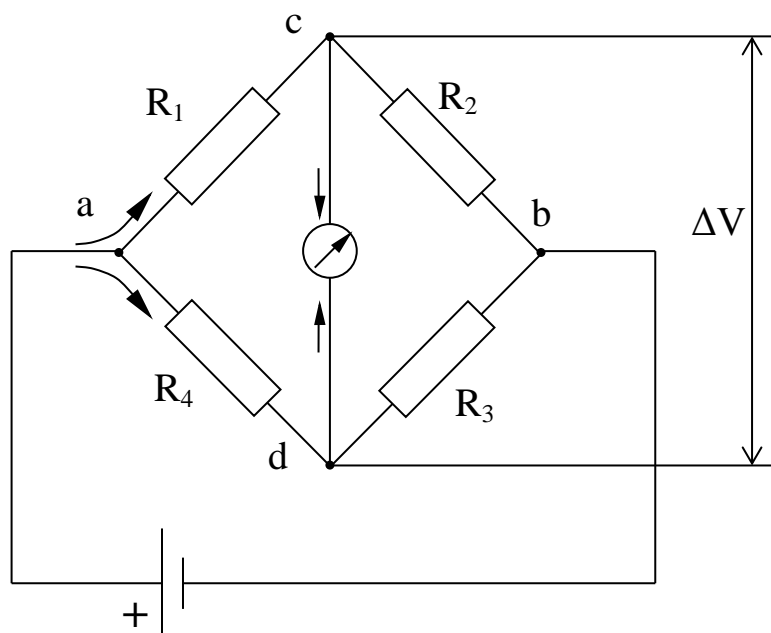


Рис. 4.9. Мост Уитстона

Если $R_1R_3=R_2R_4$, то напряжение на выходе моста равно нулю, несмотря на наличие напряжения на входе, и мост находится в состоянии электрического равновесия (мост сбалансирован). Это важное свойство моста используется для измерения электрических сопротивлений. Если на выходе моста разность потенциалов не равна нулю и через измерительную цепь проходит ток, мост называется *неуравновешенным*, или *несбалансированным*. При изменении активного сопротивления R_1 на ΔR_1 равновесие моста нарушается и через регистрирующий прибор протекает ток разбаланса I_p . Его значение зависит от степени разбаланса и напряжения питания V_n . Если сопротивление регистрирующего прибора $R_{пр} \approx \infty$, то ток I_p

практически равен нулю. Тогда выходной величиной будет напряжение разбаланса, которое определяется из соотношения

$$\Delta V = V_n \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = I_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}, \quad (4.3)$$

где I_0 – ток питания мостовой схемы. Оценкой качества работы мостовой схемы является ее чувствительность, которая может выражена как отношение приращения напряжения ΔV к деформации ϵ .

Важным является выбор типа моста. По виду симметрии плеч различают мосты:

- несимметричные, когда $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$ (плечи имеют разные сопротивления);
- симметричные относительно измерительной диагонали (первый вид симметрии), когда $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = R_4 = R_n$ (рис. 4.10, а);
- симметричные относительно питающей диагонали (второй вид симметрии), когда $R_1 = R_4 = R$, $R_2 = R_3 = R_m$ (рис. 4.10, б);
- мосты с взаимной симметрией, или равноплечие мосты (третий вид симметрии), когда $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ (рис. 4.10, в);

В электротензометрии применяются только симметричные мосты.

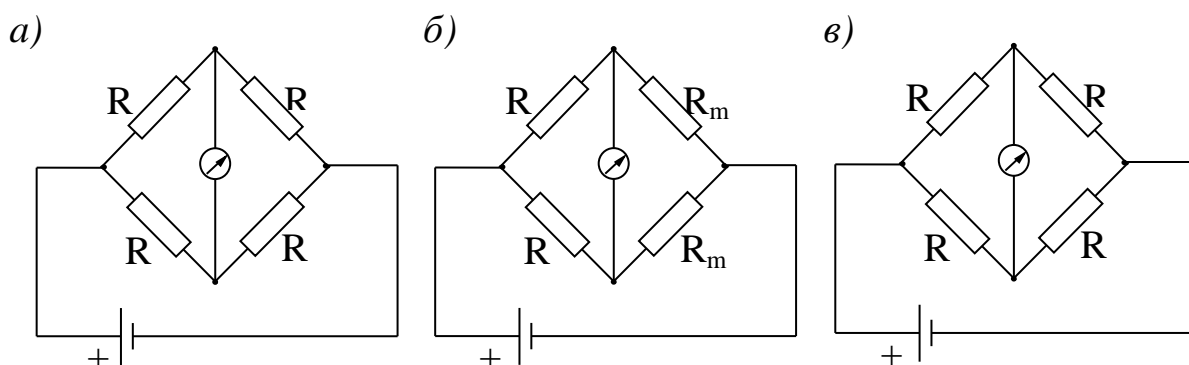


Рис. 4.10. Виды симметрии мостовых схем:

а – 1 вида (симметричные относительно измерительной диагонали); б – 2 вида (симметричные относительно питающей диагонали); в – 3 вида (равноплечие мосты)

При проведении тензометрических измерений наибольшее распространение получили четыре основные схемы включения тензорезисторов в мостовую схему (рис. 4.11). Первая схема (рис. 4.11, а) используется в основном для измерения динамических деформаций, когда не требуется температурная компенсация, и состоит из одного активного тензорезистора R_1 . Коэффициент чувствительности мостовой схемы выражается зависимостью

$$S_M = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_1 S, \quad (4.4)$$

где S – коэффициент тензочувствительности тензорезистора, I – допустимый ток через рабочий тензорезистор.

Для второй схемы (рис. 4.11, б) характерно наличие активного R_1 и компенсационного R_2 тензорезисторов. Компенсационный тензорезистор частично компенсирует влияние температуры. Коэффициент чувствительности схемы при $R_1 = R_2$ определяется зависимостью

$$S_M = \frac{1}{2} I R_1 S. \quad (4.5)$$

Если используются активный R_1 и компенсационный R_2 тензорезисторы, подключенные по третьей схеме (рис. 4.11, в), то осуществляется температурная автокомпенсация. Коэффициент чувствительности в этом случае определяется по формуле (4.4).

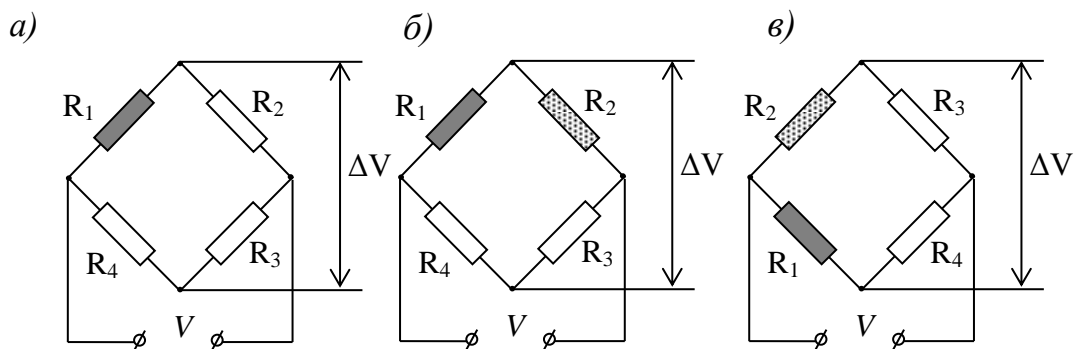


Рис. 4.11. Основные схемы включения тензорезисторов в мостовую схему:
а – с активным тензорезистором R_1 без термокомпенсации; *б* – с активным R_1 и компенсационным R_2 тензорезисторами; *в* – с активным R_1 и компенсационным R_2 тензорезисторами, обеспечивающими автокомпенсацию.

Четвертую схему (рис. 4.12) наиболее целесообразно применять в случае, когда под воздействием деформации сопротивления получают приращения ΔR_1 и ΔR_3 одного знака, а ΔR_2 и ΔR_4 – противоположного (рис. 4.12, в). При этом схема позволяет осуществлять температурную компенсацию, а коэффициент чувствительности при $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ определяется зависимостью

$$S_M = 2IRS. \quad (4.6)$$

Наиболее широкое применение в тензоизмерениях находит метод схемной термокомпенсации, основанный на том, что два тензорезистора с одинаковыми характеристиками наклеиваются клеем на один и тот же объект в непосредственной близости друг от друга и включаются

в смежные плечи симметричной мостовой схемы (рис. 4.11, б, рис. 4.11, в, рис. 4.12).

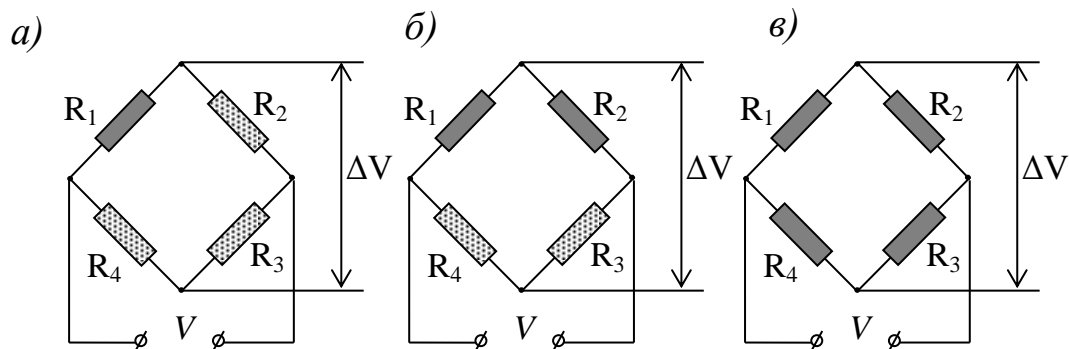


Рис. 4.12. Схемы включения активных тензорезисторов в равноплечий мост:
 а – активный R_1 , компенсационные R_2, R_3, R_4 ; б – активные R_1, R_2 , компенсационные R_3, R_4 ; в) активные R_1, R_2, R_3, R_4 (они же компенсационные)

Тензорезистор, установленный (наклеенный) на недеформируемый от действия нагрузки материал, выполняет роль компенсатора температурных приращений активного тензорезистора. Так как сопротивления активного и компенсационного тензорезисторов одинаковы ($R_{\text{акт}} = R_{\text{комп}}$), то и приращения сопротивлений от температуры будут одинаковыми ($\Delta R_{\text{акт}} = \Delta R_{\text{комп}}$). Учитывая, что на выходе моста электрический сигнал определяется алгебраической разностью приращений относительных сопротивлений смежных плеч, получаем

$$\left(\frac{\Delta R}{R_{\text{акт}}} \right)_T - \left(\frac{\Delta R}{R_{\text{комп}}} \right)_T = 0.$$

Следовательно, одинаковые приращения сопротивлений смежных плеч, вызванные изменением температуры, не приводят к разбалансу моста. Компенсационный тензорезистор можно наклеивать также на недеформируемую пластинку из того же материала, что и объект исследования.

Для достижения полной термокомпенсации необходимо оба тензорезистора наклеивать на испытуемый объект и ориентировать их таким образом, чтобы измеряемая деформация вызывала у них противоположные по знаку приращения сопротивлений. Оба тензорезистора являются одновременно и активными и компенсационными (один относительно другого) и при идентичности их рабочих характеристик $\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{T_1} - \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{T_2} = 0$, то есть достигается полная компенсация температурных погрешностей.

Чувствительность моста при такой схеме увеличивается, так как оба тензорезистора участвуют в измерении деформации.

Напряжение разбаланса ΔV в мВ при $R_{np} \approx \infty$ равно:

- для первого вида симметрии моста (относительно измерительной диагонали)

$$\Delta V = V_n \frac{a}{4} \frac{\Delta R}{R} 10^3 = \frac{I_0 R n a}{2(1+n)} \frac{\Delta R}{R}, \quad (4.7)$$

при $V_n = 2 \cdot 10^{-3} I_0 \frac{Rn}{1+n}$

$$S_{\mathcal{M}} = V_n \frac{a}{4} S \cdot 10^3 \quad (4.8)$$

- для второго вида симметрии моста (относительно питающей диагонали)

$$\Delta V = V_n \frac{ma}{(1+m)^2} \frac{\Delta R}{R} 10^3 = \frac{I_0 R m a}{2(1+m)} \frac{\Delta R}{R}, \quad (4.9)$$

при $V = 0,5 \cdot 10^{-3} I_0 R (1+m)$

$$S_{\mathcal{M}} = V_n \frac{ma}{(1+m)^2} S \cdot 10^3 \quad (4.10)$$

- для третьего вида симметрии моста (с взаимной симметрией)

$$\Delta V = V_n \frac{a}{4} \frac{\Delta R}{R} 10^3 = \frac{I_0 R a}{4} \frac{\Delta R}{R}, \quad (4.11)$$

при $V = 1 \cdot 10^{-3} I_0 R$

$$S_{\mathcal{M}} = V_n \frac{a}{4} S \cdot 10^3. \quad (4.12)$$

В формулах (4.5) – (4.10) обозначено V_n – напряжение питания моста в вольтах; I_0 – ток питания моста в мА; a – число активных плеч моста с равными относительными приращениями сопротивления; $m = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$;

$n = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$. Варианты размещения тензорезисторов на объекте и способы их соединения в схемы приведены в табл. 4.4.

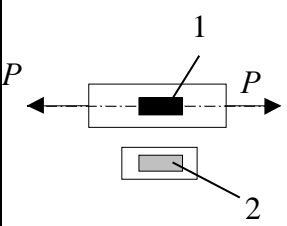
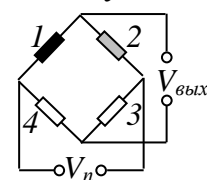
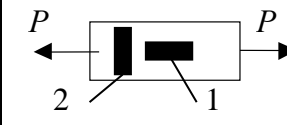
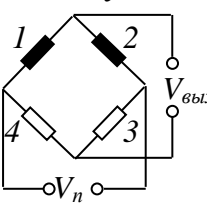
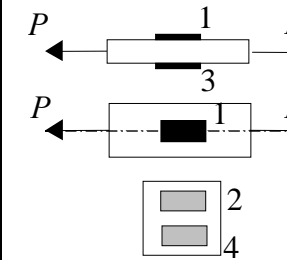
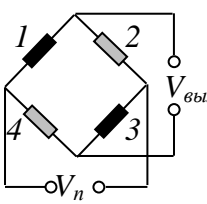
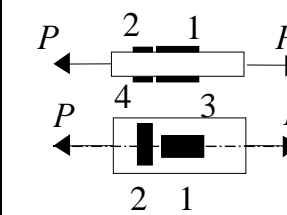
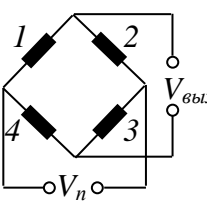
Герметики

При проведении испытания объектов в условиях повышенной влажности и значительного времени тензорезисторы следует защищать от воздействия влаги. Влага, проникающая в материал подложки и клея вызывает его набухание. Вследствие этого ухудшаются их механические и метрологические характеристики, увеличивается ползучесть ТР. Ухудшаются характеристики электрической изоляции ТР от объекта испытаний.

В зависимости от температуры и времени действия влаги на ТР для обеспечения герметизации ТР используются различные влагозащитные покрытия. При нормальной температуре защиту от влаги ТР можно обеспечить нанесением нескольких слоев (от 2 до 15) влагостойких клеев БФ-2, БФ-4, №88, ВК-32 и др.

При очень высокой влажности применяют защитные покрытия изготовленные на основе битума, канифоли, воска и эпоксидных смол. Применения покрытия для защиты от влаги не должно вызывать коррозию объекта. Хорошо изолирует от влаги кремнийорганический компаунд Виксинт К-68.

Таблица 4.4. Варианты размещения тензорезисторов

№№ схем	Измерительная нагрузка	Расположение тензорезисторов на объекте исследования	Включение тензорезисторов в мост	Выходное электрическое напряжение моста, В	Скомпенсированные величины
1	P (растяжение-сжатие)		Полумост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{V_n}{4} \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{4} S$	Температура
2	P (растяжение-сжатие)		Полумост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{(1 + \mu)}{4} V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{4} (1 + \mu) S$	Температура
3	P (растяжение-сжатие)		Полный мост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{V_n}{2} \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{2} S$	Температура, изгиб
4	P (растяжение-сжатие)		Полный мост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{1 + \mu}{2} V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{2} (1 + \mu) S$	Температура, изгиб

№№ схем	Измерительная нагрузка	Расположение тензорезисторов на объекте исследования	Включение тензорезисторов в мост	Выходное электрическое напряжение моста, В	Скомпенсированные величины
5	М (изгиб)		Полумост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{V_n}{2} \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{2} S$	Температура, растяжение-сжатие
6	М (изгиб)		Полный мост 	$V_{\text{вых}} \approx V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = V_n S$	Температура, растяжение-сжатие
7	М _к (кручение)		Полумост 	$V_{\text{вых}} \approx \frac{V_n}{2} \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = \frac{V_n}{2} S$	Температура, растяжение-сжатие, изгиб
8	М _к (кручение)		Полный мост 	$V_{\text{вых}} \approx V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_M = V_n S$	Температура, растяжение-сжатие, изгиб

Примечание:

■ – активные тензорезисторы

▒ – компенсационные тензорезисторы на пластинке

Определение напряженно-деформированного состояния по замеренным деформациям.

Для одноосного напряженного состояния для описания поля деформаций достаточно одного датчика (ТР). Его продольная ось имеет одинаковое направление с направлением главной деформации и тогда

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1. \quad (4.13)$$

Двухэлементные розетки применяются в случае, если направление главных напряжений (деформаций) на поверхности детали известно. В двухэлементной розетке при наклейке тензорезисторов их ориентируют по направлениям главных деформаций ε_1 и ε_2 (рис. 4.13) по которым вычисляются главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1). \quad (4.14)$$

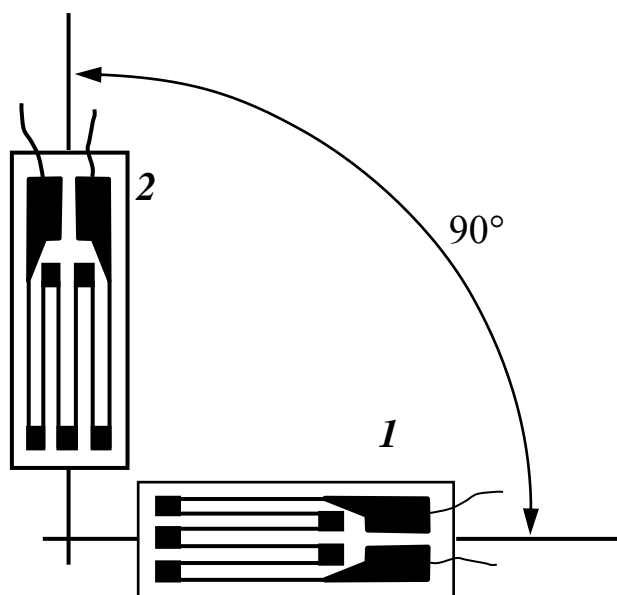


Рис. 4.13. Прямоугольная двухэлементная розетка

В прямоугольной трехэлементной розетке тензорезисторы устанавливаются обычно под углами 45° друг к другу (рис. 4.14). Такие розетки используют в тех случаях, когда приблизительно известно направление главных деформаций на поверхности исследуемого объекта. Тензорезисторы 1 и 3 ориентируют по направлениям предполагаемых осей.

Максимальная нормальная относительная деформация ε_{\max} вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\}. \quad (4.15)$$

Минимальная нормальная относительная деформация ε_{\min} вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\}. \quad (4.16)$$

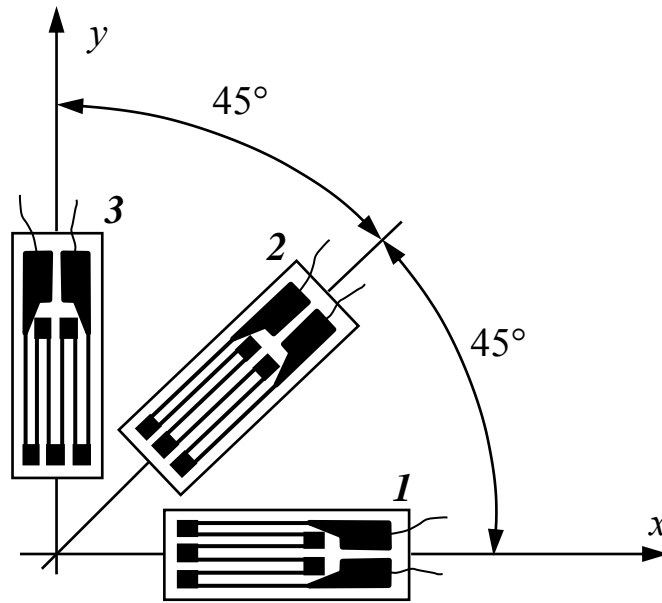


Рис. 4.14. Прямоугольная трехэлементная розетка

Деформация сдвига

$$\gamma_{13} = 2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3). \quad (4.17)$$

Нормальные напряжения по направлениям ТР равны

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3); \quad (4.18)$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1); \quad (4.19)$$

$$\tau_{13} = \frac{E}{2(1+\mu)} [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]. \quad (4.20)$$

Угол, определяющий направление главных деформаций относительно оси TP (1), находим из уравнения

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \quad (4.21)$$

Когда направление главных напряжений неизвестно, применяют *дельта-розетку*. Дельта-розетка позволяет получить хорошие результаты даже при наиболее неблагоприятной ориентировке тензорезисторов относительно главных напряжений.

Максимальная нормальная относительная деформация ε_{\max} вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + \sqrt{\left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sqrt{3}} \right)^2}. \quad (4.22)$$

Минимальная нормальная относительная деформация ε_{\min} вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \sqrt{\left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (4.23)$$

Максимальная деформация сдвига γ_{\max} вычисляется по формуле

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}\right)^2 - \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (4.24)$$

Угол α между осью тензорезистора (I) и направлением главных деформаций равно

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}}. \quad (4.25)$$

4.2. Оптоволоконные датчики деформации

В оптоволоконных сенсорах деформации используется дифракционная решетка Брэгга, которая содержит большое количество точек отражения, расположенных внутри волокна с определенным интервалом. При прохождении лазерного излучения через волокно часть его на определенной длине волны отражается от решетки. Этот пик отраженного излучения регистрируется измерительной аппаратурой. В результате деформации изменяется интервал между узлами решетки Брэгга, а также коэффициент преломления волокна. Соответственно, изменяется длина волны излучения, отраженного от решетки. По изменению длины волны можно определить величину деформации.

Коэффициент тензочувствительности оптических сенсоров деформации определяется по аналогии с тензорезисторами:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = k\varepsilon_1, \quad (4.26)$$

где λ – длина волны, на которой происходит отражение от решетки Брэгга, $\Delta\lambda$ – изменение λ при деформации волоконной решетки, k – коэффициент тензочувствительности, ε – деформация.

Чувствительность оптических датчиков определяется изменением расстояния между точками отражения в решетке Брэгга и коэффициента преломления оптоволоконного волокна вследствие деформации. Коэффициент тензочувствительности k , обусловленный первым фактором, равен единице – в данном случае влиянием изменения поперечного сечения волокна, кото-

рое для тензорезисторов учитывается через коэффициент Пуассона, можно пренебречь. В результате изменения коэффициента преломления значение k уменьшается примерно на 0,22. Таким образом, коэффициент тензочувствительности волоконной решетки Брэгга составляет около 0,78.

Сенсоры с волоконной решеткой Брэгга имеют большую толщину, чем электрические тензорезисторы. Поэтому при измерении изгибающих напряжений на тонких объектах оптическими сенсорами необходимо пользоваться формулой, которая учитывает толщину сенсора:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{0,5h}{0,5h + d} \varepsilon_{\text{в}}, \quad (4.27)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – деформация на поверхности объекта; $\varepsilon_{\text{в}}$ – деформация, измеряемая волокном, h – толщина объекта измерения, d – расстояние между волокном и поверхностью объекта.

Оптические сенсоры деформации НВМ могут использоваться в температурном диапазоне от 0 до 80°C.

Современные оптические сенсоры деформации не предусматривают автокомпенсацию температурной зависимости. Сигнал таких сенсоров гораздо в большей степени зависит от температуры, чем сигнал тензорезисторов. Минимальный радиус изгиба для оптических сенсоров деформации НВМ составляет 25 мм. При монтаже с изгибом данного радиуса измерительная точка работает должным образом. Оптические сенсоры деформации обладают следующими неоспоримыми преимуществами по сравнению с фольговыми тензорезисторами:

- оптические сенсоры деформации позволяют проводить испытания с большим числом циклов нагружения даже на материалах с высокими значениями деформации;
- оптические сенсоры деформации можно использовать в зонах с электромагнитными влияниями или во взрывоопасных средах;
- оптические сенсоры деформации позволяют упростить кабельную систему. Несколько оптических элементов можно встроить в одно стекловолокно. Таким образом, оптическая измерительная цепь адаптируется к специфическим требованиям конкретной задачи.




Некоторые оптические сенсоры, выпускаемые фирмой НВМ (Германия), приведены в табл. 4.5.

Среди достоинств оптических сенсоров следует отметить:

- простоту установки сенсора (установка аналогична фольговым ТР);
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- возможность применения во взрывоопасных средах;

- меньшие затраты на соединительные провода по сравнению с тензодатчиками;
- меньшая масса стекловолокна по сравнению с традиционно применяемыми соединительными проводами

Таблица 4.5. Оптические сенсоры

		
<p>Оптический тензодатчик <i>OL</i></p>	<p>Розетка оптических тензодатчиков <i>OR</i></p>	<p>Оптический тензодатчик компенсации температуры <i>OTC</i></p>
<p>Оптический тензодатчик на основе волоконной решётки Брэгга; до 13 оптических тензодатчиков на стекловолокно</p>	<p>Розетка оптических тензодатчиков на основе волоконной решётки Брэгга</p>	<p>Оптический датчик компенсации температуры с алюминиевым чувствительным элементом; до 13 оптических датчиков на стекловолокно</p>

5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

5.1. Физические основы термометрии

Температура – физическая величина, определяемая как параметр состояния термодинамического равновесия микроскопических систем. Термодинамическая температура (T) всегда положительна и измеряется с помощью термодинамической шкалы, единицей которой служит 1 Кельвин (K). Шкала Кельвина связана с общепринятой шкалой Цельсия соотношением

$$T = t + 273,15 \text{ K},$$

где t – температура по шкале Цельсия.

Цена деления шкалы Кельвина и Цельсия одинакова, то есть $1\text{K}=1^\circ\text{C}$. Абсолютный ноль соответствует $t = -273,15^\circ\text{C}$. Поскольку температура является величиной экстенсивной, то она измеряется косвенным образом путем преобразования ее в какую-либо интенсивную (непосредственно измеряемую) величину, например электрический ток. Методы измерения температуры являются, по существу, методами измерения термометрических свойств, которые должны однозначно зависеть от температуры и измеряться достаточно просто и точно.

Методы измерения температуры принято делить на две большие группы – контактные и бесконтактные, которые, в свою очередь, подразделяются по физическим эффектам, положенным в основу принципа их действия. В табл. 5.1 приведены основные методы и средства измерения температуры и их усредненные характеристики для соответствующих преобразователей (датчиков).

5.2. Контактные методы термометрии

Действие жидкостных стеклянных термометров основано на изменении объёма жидкости при нагревании или охлаждении. Они обычно состоят из наполненного термометрической жидкостью стеклянного резервуара, соединённого с капиллярной трубкой, свободный конец которой запаян. Резервуар, капилляр и скрепленная с ними шкала располагаются в общем стеклянном корпусе. Диапазон измерения температур от -80 до $+70^\circ\text{C}$ для спиртовых, от -35 до $+750^\circ\text{C}$ для ртутных термометров. Верхний предел температур ограничен температурой размягчения стекла ($+780^\circ\text{C}$).

Изготавливают также «палочные» жидкостные термометры с толстостенными капиллярами, на наружной поверхности которых нанесено шкала. Длина таких термометра достигает 600 мм. Цена деления шкалы $0,1^\circ\text{C}$, основная погрешность от $\pm 0,2^\circ\text{C}$ (в диапазоне от -80 до $+100^\circ\text{C}$) до $\pm 5^\circ\text{C}$ (в диапазоне до 750°C).

Различные виды стеклянных жидкостных термометров показаны на рис. 5.1.

Таблица 5.1. Методы и средства термометрии

Средства измерения	Постоянная времени, с	Пороговая чувствительность, °С	Пространственная разрешающая способность, мм	Температурный диапазон, °С
Контактный метод				
Термометры расширения				
Жидкостные стеклянные	20 – 100	0,01	5 – 10	–100...+600
Манометрические	50 – 200	0,01	20 – 100	–100...+700
Дилатометрические	100 – 300	0,1	10 – 100	–50...+200
Биметаллические	100 – 300	0,1	10 – 100	–50...+600
Электро-термометры				
Термоэлектрические	20 – 200	0,01	1 – 5	–260...+2000
Терморезистивные	50 – 300	0,001	10 – 100	–270...+1600
Термошумовые	10 – 100	0,01	10 – 100	–270...+3000
Термомагнитные	10 – 100	0,01	20 – 50	–250...+270
Термочастотные	10 – 100	0,0001	20	–40...+200
Термемкостные	20 – 200	0,01	20 – 100	–40...+300
Термотранзисторные	50 – 100	0,1	20 – 50	–70...+200
Волоконно-оптические	0,1 – 10	0,1	0,5 – 1	–10...+150
Термоиндикаторы				
Термохромные	5 – 10	0,5	1 – 5	+20...+150
Жидко-кристаллические	5 – 10	0,2	0,5 – 2	+18...+120
Плавающиеся	10 – 50	1	5 – 10	+20...+300
Люминофорные	10 – 100	0,5	1 – 5	+20...+200
Изооптические	10 – 50	0,5	1 – 10	–20...+150
Бесконтактный метод				
Пирометры излучения				
Яркостные	$10^{-3} - 10^{-6}$	1 – 10	0,5 – 5	+100...+3000
Цветовые	$10^{-3} - 10^{-5}$	1 – 5	0,2 – 1,0	+200...+3500
Радиационные	10^{-3}	0,1 – 1	0,1– 0,5	–100...+2000
Тепловизоры:				
оптико-механические	$1 - 5 \cdot 10^{-2}$	0,01	0,1 – 1	–20...+1500
пировидиконные	$5 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,1 – 1	+20...+800
Лазерные пирометры	$10^{-3} - 10^{-6}$	1 – 10	1 – 20	+400...+3000
Спектрофотометрические пирометры	$10^{-3} - 10^{-5}$	1 – 5	5 – 20	+600...+6000
Акустические пирометры	10^{-3}	1 – 10	100 – 500	+50...+600

Характеристики основных термометрических жидкостей приведены в табл. 5.2. При измерении температуры термометрами, заполненными органическими жидкостями, происходит смачивание стекла этими жидкостями, и как следствие, снижение точности отсчета показаний.

Жидкостные стеклянные термометры по своему назначению и области применения можно разделить на образцовые, лабораторные, технические, метеорологические, термометры специального назначения, для сельского хозяйства и бытовые.

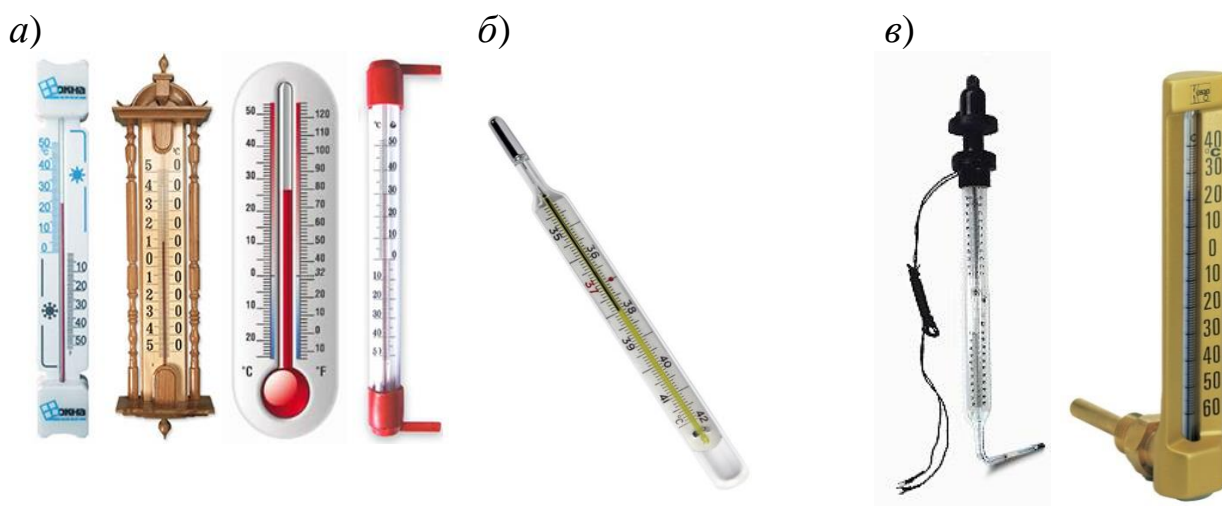


Рис. 5.1. Жидкостные стеклянные термометры:

а – виды стеклянных термометров; *б* – медицинский; *в* – промышленные

Таблица 5.2. Термометрические жидкости

Жидкость	Диапазон измерений, °С		Коэффициент объемного теплового расширения, К ⁻¹
	нижний	верхний	
Пентан	-200	+20	0,00092
Этиловый спирт	-80	+70	0,00105
Керосин	-20	+300	0,00096
Ртуть	-35	+750	0,00018
Толуол	-90	+200	0,00108

Технические термометры ртутные электроконтактные типа ТПК применяются для целей регулирования и сигнализации температуры в лабораторных и промышленных условиях. Изготавливают с одним подвижным контактом, который можно перемещать внутри капилляра при помощи специального магнитного устройства, и вторым неподвижным контактом, впаянным в капилляр термометра. Замыкание или размыкание электрической цепи между контактами происходит вследствие расширения или сжатия ртути при нагревании или охлаждении нижней части термометра. Пространство над ртутью в капилляре заполняют предварительно

очищенным от влаги и кислорода водородом. Электроконтактные термометры могут работать в цепях постоянного или переменного тока. Термометры изготавливаются прямыми и изогнутыми под углом 90° . При установке термометров непосредственно в аппаратах, агрегатах, трубопроводах во избежание поломок обычно заключают их в защитную оправу.

Конструктивно электроконтактный термометр типа ТПК с магнитным передвижением контакта имеет две шкалы: верхнюю и нижнюю. Общий вид термометра показан на рис. 5.1, в, конструкция показана на рис. 5.2.

Верхняя вспомогательная шкала нанесена на шкальной пластине вдоль овальной стеклянной трубки 1, припаянной к капилляру 2. Для установки нужной температуры срабатывания является овальная гайка 3, которая может перемещаться по микровинту 4 вверх и вниз. Верхний конец микровинта жестко соединен со стальным цилиндрическим якорем 8, а нижний его конец опирается на подпятник 6.

Вращение якоря и микровинта, а также перемещение овальной гайки по микровинту осуществляется с помощью постоянного магнита 7, установленного на колпачке 8, который надет на стеклянную трубку, припаянную к овальной трубке 1. Неподвижный контакт 9, соединенный с медным проводом 10, впаян в капилляр ниже нулевой отметки основной шкалы. Подвижный контакт 11 выполнен из тонкой вольфрамовой проволоки, верхний конец которой закреплен в овальной гайке 3. Контакт соединен с медным проводом 12.

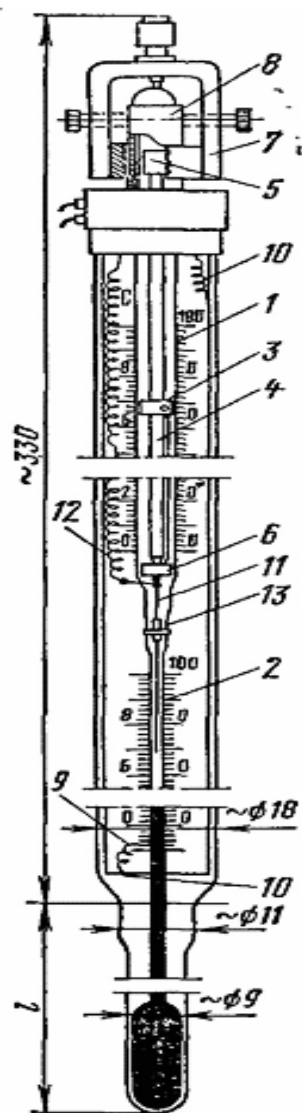


Рис. 5.2. Термометр ртутный электроконтактный типа ТПК:

- 1 – овальная стеклянная трубка;
- 2 – капилляр; 3 – овальная гайка;
- 4 – микровинт; 5 – стальной цилиндрический якорь;
- 6 – подпятник; 7 – постоянный магнит; 8 – колпачок;
- 9 – неподвижный контакт;
- 10, 12 – медный провод;
- 11 – подвижный контакт;
- 13 – направляющая стеклянная трубка

Нижняя часть вольфрамовой проволоки проходит через отверстие в подпятнике, далее соприкасается с выводным проводником, припаянным к подпятнику, и затем проходит через отверстие направляющей стеклянной втулки 13, впаянной в расширенную часть капилляра.

Таким образом, нижний конец вольфрамовой проволоки, находящийся в измерительном капилляре, является подвижным контактом термометра. Если овальная гайка будет передвинута по микровинту с помощью магнита на определенную отметку верхней шкалы, то нижний конец вольфрамовой проволоки (подвижный контакт) будет установлен против соответствующей отметки нижней основной шкалы. При нагревании или охлаждении нижней части термометра до заданной температуры ртуть в капилляре соединит или разомкнет нижний контакт с подвижным контактом.

Для электроконтактных термометров типа ТПК нагрузка на контактах термометра не должна превышать 0,5 мА при напряжении не больше 0,3 В. Допускаемая разрывная мощность контактов не должна превышать 2 Вт при силе тока не более 0,2 А.

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего вещества (жидкости, газа или пара с жидкостью) в замкнутой системе постоянного объема от температуры. В зависимости от рабочего вещества различают газовые, жидкостные и конденсационные термометры.






Конструктивно манометрические термометры представляют собой герметичную систему, состоящую из баллона, соединённого капилляром с манометром. Термобаллон погружается в измеряемую среду. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне происходит изменение давления во всей замкнутой системе, которое через капиллярную трубку передается на манометр. В зависимости от назначения манометрические термометры бывают показывающими, самопишущими, а также состоящими только из первичного преобразователя давления для дистанционной передачи сигнала. Общий вид манометрических термометров, их конструктивное исполнение с характеристиками приведены в табл. 5.3. Часто к манометрическим термометрам подключают устройства управления и сигнализации. Термометры этой группы особенно эффективны при контроле температуры в агрессивных средах, взрывоопасных помещениях и в других сложных условиях.

Жидкостные манометрические термометры заполняются ртутью, толуолом, ксилолом, метиловым или пропиловым спиртом. Диапазон измерения температур для жидкостных термометров составляет от -150 до 400 °С. Благодаря большой теплопроводности жидкости, такие термометры менее инерционны по сравнению с газовыми. Шкалы ртутных и спир-

товых термометров равномерные, шкала термометра, заполненного кси-
 лолом, неравномерная в диапазоне температур выше 120 °С.

Газовые манометрические термометры заполняются азотом или гелием. Диапазон измерения температур может составлять от -200 до +800°С. Шкала равномерная. На показания газовых манометрических термометров оказывает влияние температура капиллярной трубки, если она отличается от температуры термобаллона. Для уменьшения, этой погрешности термометрический баллон имеет объем, во много раз превышающий объем капиллярной трубки.

Таблица 5.3. Термометры манометрические жидкостные

				
Класс точности				
±2%	±2%	±1...2%	±1%	±1%
Диапазон температур				
от -100 до +400°С	от -80 до +300°С	Ртуть (-30...+600)°С Ксилол (-40...+200)°С	от 0 до +160°С	от +50 до +700°С
Тип устройства				
а) Тип IFC WIKA	б) Тип 70 WIKA	в) Тип 73 WIKA	г) Тип 74 WIKA	д) Тип 75 WIKA

Принцип работы *конденсационных манометрических термометров* основан на зависимости давления насыщенного пара от температуры. Термодатчик заполнен (примерно на 2/3) жидкостью с низкой температурой кипения (ацетон, бензол, фреон, хлористый этил, пропан, этиловый эфир).

Конденсационные манометрические термометры (рис. 5.3) обладают высокой чувствительностью. Шкалы термометров неравномерны в связи с нелинейной зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Диапазон измерения температур составляет от -50 до +300 °С.

Особенностью манометрических термометров является довольно большая тепловая инерционность. Показатель тепловой инерции в непо-

движной газовой среде составляет 500–800 с, в жидкой среде 15–30 с. Инерционность зависит от размера баллона и его заполнения. Некоторые виды и характеристики жидкостных манометрических термометров приведены в табл. 5.3, а конденсационных манометрических термометров – в табл. 5.4.



Рис. 5.3. Термометры манометрические конденсационные:
а – тип ТКП-100Эж – термометр показывающий электроконтактный;
б – тип ТКП WKA; в – тип ТКП-60/3М2-100

Дилатометрические (объемные) термометры основаны на явлении расширения (сжатия) твердых тел, жидкостей или газов при увеличении (уменьшении) температуры. относительном удлинении при нагреве или охлаждении двух тел (обычно металлических) с различными температурными коэффициентами линейного расширения.

Дилатометрические термометры стержневого типа представляют собой металлическую трубку с закрытым дном, в которую вставлен стержень из материала с малым коэффициентом линейного расширения (кварц, фарфор). Коэффициент линейного расширения стержня значительно меньше коэффициента линейного расширения трубки.






Поэтому при ее нагреве стержень перемещается относительно трубки и приводит в движение измерительный орган прибора. Температурный диапазон работы преобразователей, основанных на расширении твердых тел, определяется стабильностью свойств материалов при изменении температуры. Обычно с помощью таких преобразователей измеряют температуры в диапазоне от -60 до $+400^{\circ}\text{C}$.

Обычно с помощью таких преобразователей измеряют температуры в диапазоне от -60 до $+400^{\circ}\text{C}$. Погрешность преобразования составляет 1–5 %.

Температурный диапазон работы преобразователя с расширяющейся жидкостью зависит от температур замерзания и кипения последней (для ртути от -39 до $+357^{\circ}\text{C}$, для амилового спирта от -117 до $+132^{\circ}\text{C}$, для ацетона от -94 до $+57^{\circ}\text{C}$). Погрешности жидкостных преобразователей составляют 1 – 3 % и в значительной степени зависят от температуры окружающей среды, изменяющей размеры капилляра. Нижний предел из-

мерения преобразователей, использующих в качестве рабочей среды газ, ограничивается температурой сжижения газа (-195°C для азота, -269°C для гелия), верхний предел определяется теплостойкостью баллона. Шкала дилатометрических термометров является линейной. Дилатометрические термометры применяют в качестве датчиков в системах автоматического регулирования, сигнализации и т.д. Некоторые виды дилатометрических термометров приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.4. Термометры дилатометрические

Тип ДР-ТП	Тип ТАД-101	Тип ТЭ-01	Тип ТА-1038	Тип ТУДЭ-М1
				
Погрешность срабатывания				
$\pm 5^{\circ}\text{C}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$\pm 4^{\circ}\text{C}$
Температурный диапазон срабатывания				
$0 \dots +90^{\circ}\text{C};$ $+30 \dots +110^{\circ}\text{C}$	$+10 \dots +90^{\circ}\text{C}$	$0 \dots +50^{\circ}\text{C};$ $+50 \dots +125^{\circ}\text{C}$	$+10 \dots +90^{\circ}\text{C}$	$-60 \dots +40^{\circ}\text{C}$

В биметаллических термометрах чувствительным элементом служит биметаллическая пластинка, выполненная из материалов с различными коэффициентами линейного расширения, например, из инвара и стали. На рис. 5.4 показана схема работы биметаллического термометра.

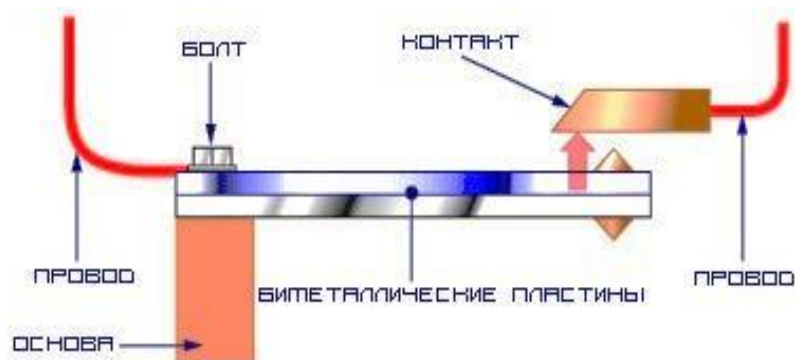







Рис. 5.4. Схема работы биметаллического термометра

Если один конец пластинки закрепить, то перемещение ее свободного конца при нагреве будет пропорционально разности коэффициентов линейного расширения металлов пластинки.

Шкала этих приборов – равномерная. Биметаллические термометры используют в термографах для записи и изменения температуры во времени, в приборах для автоматической регистрации температуры, регулирования производственных процессов и т.д. Диапазон измерения температур от -70° до $+600^{\circ}$ градусов.

Примеры конструктивного оформления биметаллических термометров и их характеристик приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Термометры биметаллические

Тип БТ серия 211	Тип БТ серия 220	Тип БТ серия 220	WIKА, тип 52	WIKА, Тип 53
				
Класс точности				
1,5	1,5	1,5	1,0	1,0
Температурный диапазон				
от -30 до $+450^{\circ}\text{C}$.	от -30 до $+450^{\circ}\text{C}$	от -30 до $+600^{\circ}\text{C}$.	от -30 до $+500^{\circ}\text{C}$	от -60 до $+500^{\circ}\text{C}$.
Длина штока				
до 300 мм	до 1000 мм	до 1600 мм	до 160 мм	до 610 мм

Действие термоэлектрических термометров основано на эффекте Зеебека, заключающегося в том, что в замкнутой цепи, составленной из разнородных проводников (или полупроводников), возникает электрический ток, если различна температура мест их соединения (спаев). Величина термо-ЭДС зависит от комбинации соединяемых металлов и является линейной функцией температуры спаев. Величина термо-ЭДС определяется выражением

$$E = \alpha (t_1 - t_2),$$

где α – коэффициент пропорциональности, индивидуальный для каждой пары металлов; t_1, t_2 – температуры спаев. Значение α колеблется в среднем от $41 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ (медь-константан, марганец-константан) до $60 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ (константан-хром-никель). Температуру одного из спаев (свободного) поддерживают постоянной (обычно 0°C) для получения однозначности и стабильности работы термометра.

Главные преимущества термопар (ТП):

- широкий диапазон рабочих температур, это самый высокотемпературный из контактных датчиков;
- спай термопары может быть непосредственно заземлен или приведен в прямой контакт с измеряемым объектом;
- простота изготовления, надежность и прочность конструкции.

Термопары из неблагородных металлов очень широко используются во всех отраслях промышленности. Они дешевы и просты в обращении, устойчивы к вибрациям, могут выпускаться во взрывозащищенном исполнении. Особенно удобны в обращении кабельные термопары, электроды которых заключены в специальный герметичный гибкий кабель с минеральной изоляцией. Такая конструкция позволяет расположить термопару в самых сложных конструктивных узлах объекта.

Преимуществом термопар также является высокая чувствительность. Существенным недостатком является образование термоэлектрической неоднородности в зоне максимального градиента температур, что может привести к ошибке в градуировке более 5°C . Поэтому термопары из неблагородных металлов лучше поверять на месте их рабочего монтажа.

Наибольшее распространение получили следующие материалы для термопар: платина, платинородий, хромель, алюмель, копель, а также железо, медь и константан.

Наиболее точными являются термопары с термоэлектродами из благородных металлов: платинородий-платиновые ПП (тип S (Pt-10%Rh / Pt) (тип R (Pt-13%Rh / Pt), платинородий-платинородиевые ПР (тип В (Pt-30%Rh / Pt-6%Rh)). Преимуществом является значительно меньшая термоэлектрическая неоднородность, чем у термопар из неблагородных металлов, устойчивость к окислению, вследствие чего высокая стабильность. Преимуществом термопары типа ПР также является практически нулевой выходной сигнал при температурах вплоть до 50°C , таким образом устраняется необходимость термостатирования холодных спаев. Недостатком является высокая стоимость и малая чувствительность (около 10 мкВ/К при 1000°C). Хотя платинородиевые термопары превосходят по точности и стабильности термопары из неблагородных металлов и сплавов, минимальная расширенная неопределенность результата измерения температуры в диапазоне до 1100°C составляет $0,2\text{--}0,3^{\circ}\text{C}$. Причины нестабильности термопар связаны с загрязнением, окислением и испарением материалов термоэлектродов. При температурах $500\text{--}900^{\circ}\text{C}$ формируется стабильный окисел родия. Недостаток родия изменяет состав платинородиевого термоэлектрода, что приводит к изменению зависимости ЭДС от температуры и к возникновению термоэлектрических неоднородностей. Основные типы термопар приведены в табл. 5.6.

Наибольшее распространение получили следующие материалы для термопар: платина, платинородий, хромель, алюмель, копель, а также железо, медь и константан.

Широкое применение термопар обусловило разнообразие их конструкций. По способу контакта со средой различают: погружаемые и поверхностные термопары. По условиям эксплуатации: стационарные; переносные; разовые, а также термопары многократного применения, термопары в защищенном от коррозии и от агрессивных сред корпусе. Статическая характеристика термопар практически линейна, а ее параметры нормированы для некоторых стандартных материалов. Погрешность измерения температуры составляет 1...5%. Диаметр зондов термопар 0,5...12 мм и более. Длина соединительных проводов до 50 м и более. Выпускаются системы многоточечного контроля на 100 термопар и более.

Таблица 5.6. Химический состав основных типов ТП и пределы измеряемых температур






Тип термопары	Обозначение типа	Химический состав термоэлектродов, массовая доля в %		Пределы измеряемых температур, С°	
		положительный	отрицательный	нижний	верхний
Медь-константановая	ТМКн	Cu	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	350
Хромель-копелевая	ТХК	Ni+9.5 Cr	Cu+(42-44)Ni+0.5Mn+0.1Fe	-200	600
Хромель-константановая	ТХКн	Ni+9.5 Cr	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	700
Железо-константановая	ТЖК	Fe	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	750
Хромель-алюмелевая	ТХА	Ni+9.5 Cr	Ni+1Si+2Al+2.5Mn	-200	1200
Нихросил-нисилловая	ТНН	Ni+14.2Cr+1.4Si	Ni+4.4Si+0.1Mg	-270	1200
Платинородий-платиновые	ТПП13 ТПП10	Pt+13Rh Pt+10Rh	Pt Pt	0	1300
Платинородий-платинородиевая	—	Pt+30Rh	Pt+6Rh	600	1700
Вольфрамрений-вольфрамрениевые	A-1; A-2; A-3	W+5 %Re	W+20 %Re	0	2200

Для измерения температур свыше +2500°С применяют термопары из карбидов металлов (гафния, ниобия, титана, циркония), на основе углеродистых и графитовых волокон. Общий вид и характеристики некоторых конструкций термопар приведены в табл. 5.7.

Принцип действия терморезистивных преобразователей основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводниковых материалов от температуры. При применении в качестве резистивного элемента полупроводниковых материалов его обычно называют термосопротивлением, терморезистором или термистором.

Металлический термометр сопротивления представляет собой резистор, изготовленный из металлической проволоки или металлической плёнки на диэлектрической подложке и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Наиболее точными и распространёнными типами термометров сопротивления являются платиновые термометры. Это обусловлено тем, что платина имеет стабильную и хорошо изученную зависимость сопротивления от температуры и не окисляется в воздушной среде, что обеспечивает их высокую точность и воспроизводимость. Эталонные термометры изготавливаются из платины высокой чистоты с температурным коэффициентом $0,003925 \text{ 1/K}$ при 0°C . В качестве рабочих средств измерений применяются также медные и никелевые термометры сопротивления. Промышленные платиновые термометры сопротивления в большинстве случаев считаются имеющими стандартную зависимость сопротивление-температура, что обеспечивает погрешность не более $0,1^\circ\text{C}$. Зависимость сопротивления некоторых металлов от температуры показана на графиках рис. 5.5.

Таблица 5.7. Термопары

Тип ТПЛ045; ТПК045	Тип ТПК135	Тип ТПК021	Тип ТПЛ124	Тип ТППТ, ТПРТ
				
Температурный диапазон				
ХК(L): ($-40 \dots +600$) $^\circ\text{C}$ ХА(K): ($-40 \dots +800$) $^\circ\text{C}$	ХА(K): ($-40 \dots +1200$) $^\circ\text{C}$	ХА(K): ($-40 \dots +1100$) $^\circ\text{C}$	ХК(L): ($-40 \dots +400$) $^\circ\text{C}$	ТППТ: ($0 \dots +1300$) $^\circ\text{C}$ ТПРТ: ($600 \dots +1600$) $^\circ\text{C}$
Длина погруженной части				
От 80 до 1250 мм	От 125 до 1250 мм	От 0,5 до 1,5 мм	От 10 до 120 мм	От 500 до 2000 мм

Термометры сопротивления, изготовленные в виде напыленной на подложку металлической плёнки, отличаются повышенной вибропрочностью, но меньшим диапазоном рабочих температур. Максимальная

верхняя граница температурного диапазона проволочных чувствительных элементов платиновых термометров составляет 660°C , плёночных – 600°C .

Терморезисторы применяют совместно с вторичными электроизмерительными приборами (мостовыми схемами), в том числе цифровыми. В металлических терморезисторах зависимость сопротивления от температуры близка к линейной. Лучшим материалом для терморезисторов является платина. Диапазон измерения температур для терморезисторов из платины и меди приведен в табл. 5.8.

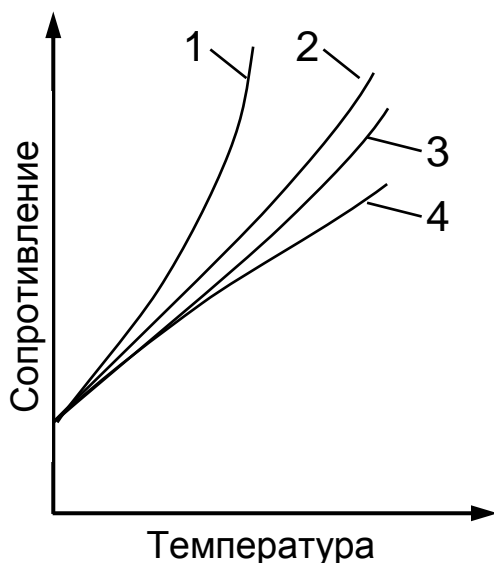


Рис. 5.5. Характеристики зависимости сопротивления некоторых металлов от температуры:
 1 – никель; 2 – вольфрам; 3 – медь; 4 – платина

Таблица 5.8. Термометры сопротивления

Тип ТС-1088Л		Тип ТС-1187Exd		Тип ТС-1288		
Температурный диапазон						
Платиновые ЧЭ (проволочные): (от -50 до $+250$) $^{\circ}\text{C}$; (от -100 до $+450$) $^{\circ}\text{C}$; (от -196 до $+500$) $^{\circ}\text{C}$; (от -196 до $+600$) $^{\circ}\text{C}$.						
Платиновые ЧЭ (плёночные): (от 0 до $+150$) $^{\circ}\text{C}$; (от -30 до $+300$) $^{\circ}\text{C}$; (от -50 до $+500$) $^{\circ}\text{C}$; (от -50 до $+600$) $^{\circ}\text{C}$.						
Медные ЧЭ: (от -50 до $+200$) $^{\circ}\text{C}$; (от -180 до $+200$) $^{\circ}\text{C}$						

Термистор, (*термосопротивление*) — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры. Терморезистор был изобретён Самюэлем Рубеном (Samuel Ruben) в 1930 году. Терморезисторы изготавливаются из материалов с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который обычно на порядки выше, чем ТКС металлов и металлических сплавов.

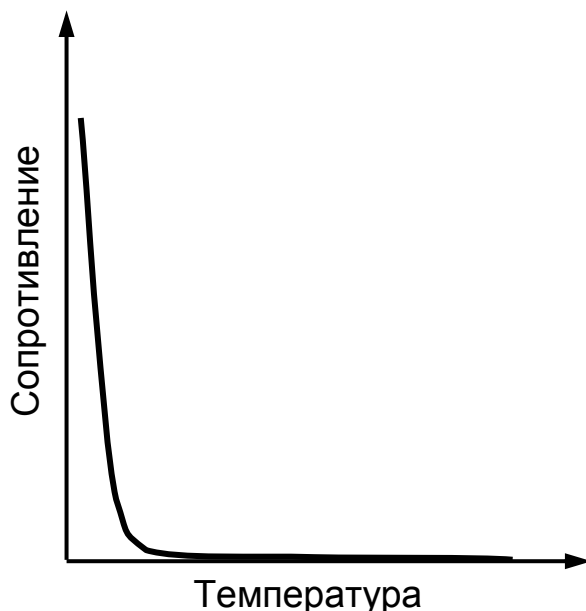


Рис. 5.6. Зависимость сопротивления типичного термистора от температуры

Типичная характеристика термистора представлена на рис.5.6. Сравнение характеристик резистивных преобразователей (рис. 5.5) с характеристиками термистора позволяет сделать следующие выводы:

- 1) характеристики термисторов являются более крутыми, то есть температурный коэффициент сопротивления (ТКС) в основной части кривой у них существенно больше, чем в металлах;
- 2) характеристики падают с увеличением температуры, то есть ТКС у них отрицательный.

Термисторы существенно меньше по габаритам (до 0,2 мм), чем металлические резистивные преобразователи. Обладают малой инерционностью (до 1 с), поэтому быстрее реагируют на изменение температуры, а также высокой чувствительностью.

Линеаризация характеристик полупроводниковых термопреобразователей (термисторов) осуществляется аналоговыми или цифровыми средствами. и от -100 до $+200^{\circ}\text{C}$ для термисторов. Однако обладают худшей, по сравнению с металлическими резисторами, стабильностью.

Общий вид различных типов и конструкций используемых термосопротивлений, показан на рис. 5.7.



Рис. 5.7. Типы и конструкции термисторов

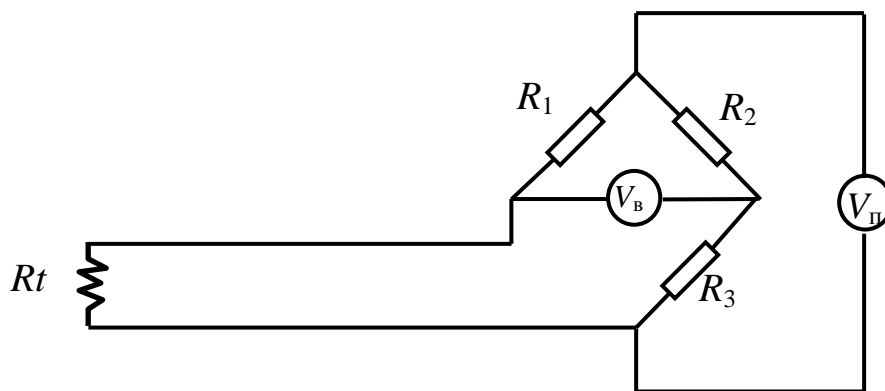


Рис. 5.8. Схема подключения терморезистора (R_t) по двухпроводной схеме

Для термометров сопротивления используются три электрические измерительные схемы включения датчика в измерительную цепь.

В *двухпроводной* схеме подключения простейшего термометра сопротивления (рис. 5.8) используется два провода. Такая схема используется там, где не требуется высокой точности измерения. Точность измерения снижается за счёт сопротивления соединительных проводов. Сопротивление соединительных проводов суммируется с собственным сопротивлением термометра и приводит к появлению дополнительной погрешности.

При *трехпроводной* схеме обеспечиваются значительно более точные измерения за счёт того, что появляется возможность измерить в отдельном опыте сопротивление подводящих проводов и учесть их влияние на точность измерения сопротивления датчика.

Четырёхпроводная схема является наиболее точной схемой измерения, обеспечивающей полное исключение влияния на результат измерения подводящих проводов. При этом по двум проводникам подается ток на терморезистор, а два других, в которых ток равен нулю, используются для измерения напряжения на нём. Недостаток такого решения – увеличение объёма используемых проводов, стоимости и габаритов изделия.

В промышленности наиболее распространенной является трёхпроводная схема. Для точных и эталонных измерений используется только четырёхпроводная схема.

Преимущества термометров сопротивления:

- высокая точность измерений (обычно лучше $\pm 1^\circ\text{C}$), может достигать до $0,013^\circ\text{C}$;
- возможность исключить влияние сопротивления линий связи на результат измерения при использовании 3- или 4-проводной схемы измерений;
- практически линейная характеристика.
- Недостатки термометров сопротивления:
- относительно малый диапазон измерений (по сравнению с термопарами);
- дороговизна для платиновых термометров сопротивления типа ТСП в сравнении с термопарами из неблагородных металлов;
- требуется дополнительный источник питания для задания тока через датчик.

Термошумовые термометры. Тепловое хаотическое движение носителей зарядов в проводниках (резисторах) приводит к тому, что на концах проводника возникают случайные напряжения. Для измерения амплитуды этих напряжений используют уравнение Найквиста:

$$U_{\text{ш}}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f, \quad (5.1)$$

где $U_{\text{ш}}^2$ – среднее квадратичное значение шумового напряжения; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; Δf – полоса частот измерения.

Как следует из формулы (5.1) среднее квадратичное значение напряжения теплового шума проводника линейно связано с его термодинамической температурой. В качестве измерительных преобразователей применяются резисторы из платины, манганина, константана, нихрома, вольфрама, графита. Температуру проводника определяют путем измерения среднее квадратичного значения шума. Термошумовой метод используется для измерения температуры в диапазоне от $0,001$ до 2500°K . Основным недостатком этого метода – низкий уровень полезного сигнала, который составляет доли микровольта. Точность термошумового метода ограничивают собственные шумы измерительного канала, помехи в линии связи, изменение коэффициента усиления входного усилителя. Широкое распространение получили термошумовые термометры, в основу которых положено сравнение средних квадратичных значений напряжений шумов двух резисторов, имеющих разные температуры, одна из которых известна.

Действие *магнитных термометров* основано на зависимости магнитной восприимчивости парамагнетиков от температуры (закон Кюри-

Вейса). Магнитные термометры применяются для измерения сверхнизких температур. В качестве чувствительных элементов используются парамагнитные соли (например, церий-магниевого нитрата) и металлы, такие как медь или платина. Термомагнитные преобразователи используются для измерения низких температур от 0,01 до 30°K с погрешностью от 1 до 5%. Достоинства термомагнитного метода состоят в отсутствии систематической погрешности и высокой чувствительности.

Среди *термочастотных термометров* наибольшее распространение получили кварцевые термометры. Их действие основано на температурной зависимости собственной резонансной частоты кварцевых пьезоэлементов (автогенераторные преобразователи с частотным выходом). Для термометрии применяют элементы с такими срезами, чтобы температурный коэффициент частоты был максимален. Такие датчики можно включить в схему высокочастотного (или релаксационного генератора), частоту которого можно измерить непосредственно частотомером. Лучшие результаты дает схема, в которой частота датчика сравнивается с частотой опорного пьезоэлемента, вырезанного из кварца с ориентацией среза, при которой температурный коэффициент частоты минимален. Резонансная частота является линейной функцией температуры. Сигнал от резонаторов можно сразу обрабатывать в цифровой форме, что удешевляет процесс контроля температуры. Типичными характеристиками кварцевых термометров являются:

- рабочая частота 5–30 МГц;
- чувствительность до 10–5 °С;
- крутизна преобразования порядка 1000 кГц/°С;
- воспроизводимость шкалы 0,01°С после циклических изменений температуры;
- нелинейность преобразования не превышает 0,1% в рабочем диапазоне температур.

Существуют термометры позволяющие измерять температуру в диапазоне –30...+100°С, с точностью 0,06°С.

Типовой кварцевый термометр состоит из трех основных узлов: чувствительного элемента, частотного преобразователя и специального вычислителя (микроконтроллера). Созданный на базе кварцевых резонаторов цифровой термометр можно использовать как многоканальную систему контроля температуры. Можно осуществить передачу частоты с преобразователя температуры на расстояния до нескольких сотен метров. Преимущественная область использования кварцевых термометров – научные исследования, связанные с высокоточными и длительными измерениями.

**Таблица 5.9. Кварцевый датчик температуры для скважин
и регистратор данных частотных датчиков**

	Характеристики датчика:	
	диапазон измеряемых температур	– 2...+70°C
	крутизна температурно-частотной характеристики при линейной аппроксимации (при +20°C)	900 Гц/°C
	выходная частота датчика при +20°	≈ 30 кГц
	тепловая постоянная времени датчика в жидкости	не более 30 с

Действие *термемкостных термометров* основано на изменении диэлектрической постоянной диэлектриков в зависимости от температуры. Наиболее пригодные материалы – триглицинсульфат (ТГС) и барийстронциевый титанат (БСТ). При измерениях температуры конденсатор, например, с БСТ в качестве диэлектрика включают в колебательный контур, резонансная частота которого при этом зависит от температуры.

Термотранзисторными термометрами (ТТТ) принято называть датчики на основе транзисторов, термометрической характеристикой которых служит обычно напряжение эмиттер-база. Для ТТТ характерна стабильность и линейность характеристик преобразования, высокая чувствительность, малые габариты и масса, экономичность. Приборы с ТТТ содержат мостовую измерительные схему, одним из плеч которой является переход эмиттера-база транзистора, на коллектор которого подается запирающее напряжение. Дискретность отсчета для ТТТ составляет 0,05...1°C; погрешность составляет порядка 0,1°C.

Волоконно-оптические термометры (ВОТ) – одни из наиболее перспективных датчиков температуры. Они выполняются из кварцевого моноволокна диаметром 0,2 ... 1 мм длиной до 100 м. На торце моноволокна, вводимого в контролируемый объем располагается микрокапсула с веществом, изменяющим свои оптические свойства при нагреве (люминофор, жидкий кристалл, двупреломляющий кристалл и т.д.). На другом торце располагаются источник света (обычно светодиод) и фотодиод для регистрации излучения, отражённого от капсулы термодатчика. Достоинство ВОТ – отсутствие гальванической связи с объектом, нечувствительность к электропомехам, нетоксичность, малые габариты, высокое быстродействие.





При физическом воздействии на оптоволокно температуры оно локально изменяет характеристики пропускания света и как следствие, приводит к изменению характеристик сигнала обратного отражения. В основе измерительных систем на основе оптоволоконных датчиков используется сравнение спектров и интенсивностей исходного лазерного излучения

и излучения, рассеянного в обратном направлении, после прохождения по оптоволокну.

Действие *термоиндикаторов* основано на изменении агрегатного состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ, при их нагревании. С их помощью можно быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта. Преимуществом термоиндикаторов является возможность запоминания распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность. К недостаткам термоиндикаторов следует отнести инерционность, сравнительно невысокую точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий, сложность изучения динамических температурных режимов. Их включение в системы терморегулирования представляет значительные трудности.

Термохромные термоиндикаторы с химическим взаимодействием компонентов (галоидные комплексные соли серебра, ртути, меди) могут вступать в реакцию с металлами, поэтому их наносят на ленты из ткани, бумаги и фольги. Существуют обратимые (многократно меняющие цвет при нагреве) и необратимые термоиндикаторы этого типа.

Таблица 5.10. Термоиндикаторы химические

Тип (ВомМарк Шорт) Ран	Тип (ВомМарк Лонг) Ран	Тип (ВомМарк Дуо)	Тип (КолдМарк)
			
Температурный диапазон			
Платиновые ЧЭ (проволочные): (от -50 до $+250$) $^{\circ}\text{C}$; (от -100 до $+450$) $^{\circ}\text{C}$; (от -196 до $+500$) $^{\circ}\text{C}$; (от -196 до $+600$) $^{\circ}\text{C}$.			
Платиновые ЧЭ (плёночные): (от 0 до $+150$) $^{\circ}\text{C}$; (от -30 до $+300$) $^{\circ}\text{C}$; (от -50 до $+500$) $^{\circ}\text{C}$; (от -50 до $+600$) $^{\circ}\text{C}$.			
Медные ЧЭ: (от -50 до $+200$) $^{\circ}\text{C}$; (от -180 до $+200$) $^{\circ}\text{C}$			

Жидкокристаллические термоиндикаторы представляют собой органические соединения, одновременно обладающие свойствами жидкостей (текучесть) и твердого кристаллического тела (анизотропии, двойное лучепреломление). При изменении температуры жидкий кристалл меняет свой цвет. Жидкие кристаллы эффективно используют при исследовании температур в электронных схемах для обнаружения дефектов типа нарушения сплошностей. Они выпускаются в виде пленок или жидких растворов.

Плавящиеся термоиндикаторы существует двух типов: плавкие покрытия и термосвидетели. Покрытия выпускают в виде карандашей (мелков), термолаков, термотаблеток (термопорошков). Изготавливаются на основе воска, старина, парафина или соединений серы, цинка, свинца (для высоких температур). На поверхности изделия термокарандашом наносят риску, которая плавится при достижении заданной температуры. Действие термолаков аналогично. Термосвидетели представляют собой нанизанные на тугоплавкую проволоку, пластинки из металлов, плавящихся при различных температурах. В табл. 5.11 показан общий вид и приведены характеристики термокарандаша MOST.

Таблица 5.11. Характеристики термокарандаша MOST

<p>Термокарандаши (термоиндикаторы) MOST</p> 	<p>Предназначен для нанесения метки на элемент еще до начала его термообработки. Метка плавится, когда элемент достигнет заданную температуру (точно в номинальной температуре). Сварщик видит на сколько горяч материал и может реагировать нужным образом, например, сделать перерыв в сварке.</p> <p>Номинальная температура, °С</p> <p>55; 80; 100; 125; 150; 175; 200; 220; 250; 280; 320; 450; 550; 800</p>
	
<p>Использование при сварочных работах</p>	

Действие люминофорных термоиндикаторов основано на температурной зависимости цвета или интенсивности люминесценции некоторых веществ, например сульфидов цинка и кадмия. Недостатком люминофорных индикаторов является необходимость точной стабилизации возбуждающего люминесценцию излучения (обычно ультрафиолетового).

Принцип действия изооптических термоиндикаторов основан на эффекте Христиансена, заключающегося в рассеянии света смесью двух прозрачных сред (например, порошок стекла в глицерине), если показатели преломления компонентов различны. При совпадении этих показателей

для какой-либо частоты света наблюдается селективное усиление направленного пропускания смеси. Зависимость дисперсионной характеристики некоторых органических жидкостей от температуры приводит к изменению цвета смеси в проходящем свете при ее нагреве. Изооптические индикаторы выпускаются в виде тонкостенных стеклянных капсул.

5.3. Бесконтактные методы термометрии

Действие пирометров излучения основано на фотоэлектрической, визуальной и фотографической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорционального их температуре. Пирометры обычно имеют объектив для фокусировки излучения на фотодетектор, светофильтры и блок электронной обработки сигнала. При контроле температуры объектов в труднодоступных полостях применяют параметры в сочетании с волоконно-оптическими световодами. Калибровка пирометра проводится по эталонным источникам.

Яркостными пирометрами измеряют спектральную яркость объекта на определенной длине волны, которая сравнивается с яркостью абсолютно черного тела (АЧТ). В качестве АЧТ используется спираль специальной лампы накаливания. Яркостные пирометры применяют для измерения высоких температур (свыше 600°C), при которых тела начинают излучать в видимой области, а интенсивность излучения достаточна для его регистрации в узком спектральном диапазоне визуально или с помощью фотоприемников типа фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), фотодиода.

Цветовыми пирометрами измеряют интенсивности излучения объекта в двух узких зонах спектра, отношение которых сравнивается с соответствующим отношением для АЧТ. Показания цветковых пирометров не зависят коэффициента излучения объектов.

Радиационные пирометры, работающие в широком спектральном диапазоне, применяют для измерения температуры слабо нагретых тел ($-100 \dots +100$) $^{\circ}\text{C}$. В них используют обычно оптические системы из материалов, прозрачных в ИК-области спектра (ИК-стёкла, некоторые кристаллы, керамика), или зеркальные (ахроматические) объективы. В качестве фотоприемников применяют тепловые детекторы (пироэлектрики, болометры) или фотонные приемники (фотосопротивления, фотодиоды). Пироэлектрический эффект состоит в изменении спонтанной поляризованности диэлектриков при изменении температуры. Пироэффект используется для создания тепловых датчиков и приемников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения. Пирометрами СВЧ диапазона можно измерять температуру подповерхностных слоёв объектов. *Болометр* – прибор для измерений

энергии излучения, основанный на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента при нагревании его вследствие поглощения измеряемого потока излучения.

Тепловизоры применяют для визуализации изображений слабо нагретых тел и оценки их температуры в отдельных точках методами сканирующей перометрии, то есть путем последовательного просмотра (сканирования) объекта узкоканальной оптической системой с ИК-приемником и формирования видимого изображения с помощью систем, аналогичных телевизионным. Сканирование осуществляется оптико-механическими системами либо электронными средствами.

Наибольшее распространение получили оптико-механические тепловизоры, в том числе цифровые с системами оперативного запоминания тепловых изображений и с устройствами их автоматизированной обработки с помощью микро-ЭВМ и микропроцессоров. В оптико-механических системах в качестве приемников излучения применяют фотосопротивления из сурьмянистого индия (спектральная чувствительность 2...5,6 мкм) или из сплава кадмий – ртуть – теллур – (КРТ) (спектральная чувствительность 8-14 мкм), охлаждаемых жидким азотом (реже – термоэлектрическим холодильником). Сканирование реализуется обычно вращающимся многогранным барабаном или колеблющимся зеркалом. Перспективны дифракционные сканеры, обладающие высоким качеством изображения при больших полях зрения. Созданы малогабаритные автономные тепловизоры.

Всё большее распространение получают тепловизоры с электронным сканированием изображений на основе пировидиконов. Конструкция пировидикона аналогична конструкции видикона. Пировидиконы имеют спектральную чувствительность мишени 0,2...20 мкм, температурную чувствительность 0,1°C (при 50 строках разложения). Они не требуют охлаждения. Общий вид и отдельные характеристики некоторых современных тепловизоров приведены в табл. 5.12.

Лазерные пирометры (ЛП) реализуются с помощью традиционных схем, принятый в газодинамическом эксперименте (теневые, интерференционные), а также на основе новых оптико-физических эффектов (когерентного рассеяния света и т.д.). Теневые и интерференционные лазерные пирометры позволяют визуализировать и вычислять распределения поля показателя преломления по сечению потока газа или жидкости, которое связано с температурным полем известными законами газовой динамики. Получают распространение лазерные томографы, позволяющие вычислять поля температур в поперечных сечениях факелов пламени, потоков газа или жидкости.

Таблица 5.12. Тепловизоры

		
Тепловизор TESTO 875 инфракрасный	Тепловизор FLUKE TiR27 инфракрасный	Тепловизор FLUKE Ti90 инфракрасный
Диапазон измерения температур		
От -20°С до +280 °С	От -20 °С до +150 °С	От -20 °С до +250 °С
Погрешность ± 2 °С	Погрешность ± 2 °С	Погрешность ± 2 °С
Тепловая чувствительность		
≤0,12 °С	< 0,045 °С	≤0,10 °С
Матрица 160×120 пикселей	Матрица 240×180 пикселей	Матрица 80×80 пикселей
Цветной ЖК-дисплей 320×240	Цветной ЖК-дисплей 640 x 480	Цветной ЖК-дисплей
Диагональ 3,5"	Диагональ 3,6 "	Диагональ 3,5"
Частота обновления 9 Гц	Частота обновления 9 Гц	Частота обновления 9 Гц
Производитель: Германия	Производитель: США	Производитель: США
		
Тепловизор SONEL KT-150 инфракрасный	Тепловизор SONEL KT-640 инфракрасный	ТЕПЛОВИЗОР NEC AVIO R500 инфракрасный
Диапазон измерения температур		
От -20° С до +250° С	Фильтр 1: от -20° С до +250° С Фильтр 2: от +200 °С до +800 °С	От -40°С до +500°С
Погрешность ± 2 °С	Погрешность ± 2 °С	Погрешность ± 1 °С
Тепловая чувствительность		
≤0,10 °С	< 0,05 °С	≤0,03 °С
Матрица 160×120 пикселей	Матрица 640×480 пикселей	Матрица 1280×960 пикселей
Цветной ЖК-дисплей 320×240	Цветной ЖК-дисплей 640×480	Цветной ЖК-дисплей
Диагональ 3,6"	Диагональ 5,7 "	Диагональ 3,5"
Частота обновления 30 Гц	Частота обновления 30 Гц	Частота обновления 30 Гц
Производитель: Польша	Производитель: Польша	Производитель: Япония

Лазерные пирометры, работающие на эффекте комбинационного рассеяния света, позволяют фокусировать излучение в любую точку измеряемого объема. Информация о температуре среды заключена в интенсивности и частоте рассеянного газом излучения, регистрируемых спектроанализатором с ФЭУ. ЛП этого типа перспективны для контроля температуры газов в сложных условиях. Применение перестраиваемых по частоте лазеров позволит применять методы резонансного комбинационного рассеяния света, отличающиеся повышенной чувствительностью.

Действие спектрофотометрических пирометров основано на измерении интенсивности характерных для нагретых газов спектральных линий поглощения оптического излучения, которая определяется температурой среды. Выделение нужных резонансных линий осуществляется спектральным прибором. Среда просвечивается светом широкополосного источника (лампа накаливания, газоразрядный источник и т.д.). Монохроматическое излучение регистрируется ФЭУ или фотодиодом.

Принцип действия акустических пирометров основан на зависимости скорости звука от температуры. Для идеального газа фазовая скорость распространения звука не зависит от амплитуды и частоты колебаний. Для точных измерений важен учет влажности воздуха. Наибольшие возможности для термометрии дают ультразвуковые колебания. Скорость ультразвуковых колебаний измеряется стандартным методом. В импульсных ультразвуковых пирометрах излучатель и приемник обычно совмещены. Возможна реализация и фазовых ультразвуковых пирометров на непрерывном ультразвуковом излучении. Достоинство ультразвуковых пирометров, работающих с газовыми средами, – практическая безынерционность и отсутствие термометрического тела, непосредственно воспринимающего изменение температуры и, как следствие, вносящего погрешности в измерения. Акустические пирометры реализуются и на твердотельных датчиках, работающих на поверхностных акустических волнах.

6. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1. Научный подход к планированию эксперимента

Эксперимент (от лат. *experimentum* – опыт, проба) является важнейшей составной частью научных исследований. В его основе лежит научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями с целью исследования какого-либо явления.

Цель проведения экспериментов – установления новых фактов об исследуемом явлении либо сравнение влияния различных условий на исследуемый процесс.

Для наибольшей эффективности эксперимента необходим научный подход к его планированию. *Планирование эксперимента* – комплекс мероприятий, направленных на эффективную постановку опытов. Основная цель планирования эксперимента – достижение максимальной точности измерений при минимальном количестве проведенных опытов и сохранении статистической достоверности результатов. Долгое время математическая статистика применялась только для обработки экспериментальных результатов, Постановка эксперимента и сам процесс экспериментирования не были формализованы. Использование аппарата матстатистики на самом первом этапе, при планировании эксперимента, позволяет:

- уменьшить ошибку эксперимента;
- сократить количество опытов;
- получить математические модели, обладающие некоторыми оптимальными свойствами;
- принимать решение на основе четких формализованных правил.

Основными типовыми задачами экспериментального исследования являются:

1) поиск значений параметров системы, обеспечивающих достижение оптимального значения показателя качества исследуемого объекта при известных ограничениях на значения этих параметров;

2) приближенное аналитическое описание функциональной связи показателей качества с параметрами системы по результатам проведенного эксперимента, при этом аналитическое описание объекта можно использовать для предварительного исследования вариантов построения системы или в интересах построения модели старшей системы, включающей данный объект на правах элемента;

3) оценка дифференциального влияния уровней параметров системы на показатель качества (если параметры системы являются по своей

природе качественными или когда количественные параметры могут принимать небольшое число различных значений).

Поиск плана эксперимента проводится в факторном пространстве. Факторное пространство (ФП) – это множество внешних и внутренних параметров модели, значения которых исследователь может контролировать в ходе подготовки и проведения эксперимента.

Значения факторов обычно называются уровнями.

Если при проведении эксперимента исследователь может изменять уровни факторов, эксперимент называется активным, в противном случае – пассивным.

Каждый из факторов имеет верхний и нижний уровни, расположенные симметрично относительно некоторого нулевого уровня. Точка в ФП, соответствующая нулевым уровням всех факторов, называется *центром плана*.

Интервалом варьирования фактора называется некоторое число, прибавление которого к нулевому уровню даёт верхний уровень, а вычитание – нижний. Как правило, план эксперимента строится относительно одного (основного) выходного параметра y , который называется *функцией отклика*.

Если моделирование используется как инструмент принятия решения, то в роли наблюдаемой переменной выступает показатель эффективности. При этом предполагается, что значение наблюдаемой переменной, полученное в ходе эксперимента, складывается из двух составляющих:

$$y = f(x) + e(x),$$

где $f(x)$ – функция отклика (неслучайная функция факторов); $e(x)$ – ошибка эксперимента (случайная величина).

Дисперсия Dy наблюдаемой переменной, которая характеризует точность измерений, равна дисперсии ошибки опыта, т.е. $Dy = De$.

Dy называют *дисперсией воспроизводимости* эксперимента. Она характеризует качество эксперимента. Эксперимент называется идеальным при $Dy = 0$.

Существует два основных варианта постановки задачи планирования имитационного эксперимента:

1. Из всех допустимых требуется выбрать такой план, который позволил бы получить наиболее достоверное значение функции отклика $f(x)$ при фиксированном числе опытов.

2. Из всех допустимых требуется выбрать такой план, при котором статистическая оценка функции отклика может быть получена с заданной точностью при минимальном объёме испытаний.

Решение задачи планирования в первой постановке называется стратегическим планированием, во второй – тактическим планированием.

При проведении опытных исследований различают *пассивный* и *активный* эксперимент.

Методология пассивного экспериментирования предполагает проведение большой серии опытных исследований с поочередным варьированием значений входных переменных x и анализом результатов измерений выходной переменной y (лабораторный эксперимент или эксперимент на пилотной установке).

К пассивному эксперименту принято относить также и сбор опытных данных в режиме эксплуатации промышленной установки (промышленный эксперимент).

Активный эксперимент проводится по заранее составленному плану, в соответствии с которым ставится задача не только определения оптимальных условий проведения эксперимента, но и оптимизации процесса (оптимальное планирование эксперимента).

Если зависимость между факторами и откликами неизвестна, применяют аппроксимацию такой зависимости степенным полиномом, называемым *уравнением регрессии*. При большем числе входных переменных (x_1, \dots, x_m) надёжных методов определения вида уравнения регрессии (вида эмпирической модели) в настоящее время не существует.

При определении оптимальных условий проведения процесса с использованием эмпирических моделей (например, методом Бокса-Вильсона) выходная переменная y является критерием оптимальности или целевой функцией.

Активный эксперимент планируется таким образом, чтобы упростить обработку его результатов методами регрессионного и корреляционного анализа.

К достоинствам активного экспериментирования относятся:

- возможность предсказания количества опытов, которые следуют провести;
- определение точек факторного пространства, где следует проводить опыты;
- отсутствие проблем, связанных с выбором вида уравнения регрессии;
- возможность определения оптимальных параметров процесса экспериментально-статистическим методом;
- сокращение объёма опытных исследований.

6.2. Основы планирования многофакторного эксперимента

В общем случае объект исследования представляется в виде структурной схемы, основанной на принципе «черного ящика», описанном в первой части данного пособия [41, с. 71].

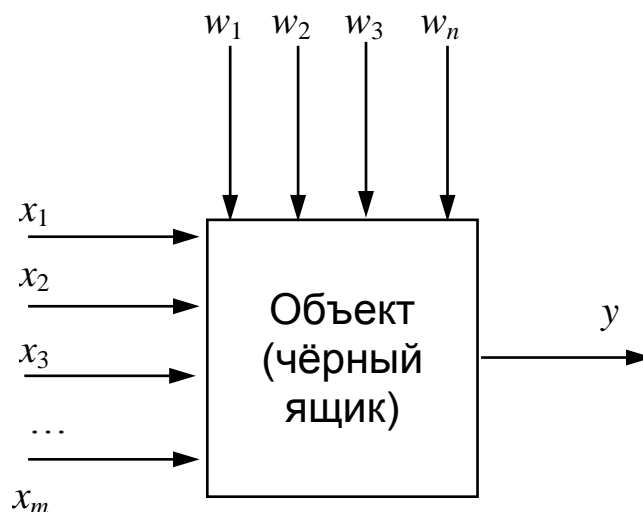


Рис. 6.1. Схема объекта исследования

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) предполагает возможность управления объектом по одному или нескольким независимым каналам. Схема такого эксперимента в общем случае может быть представлена в виде, представленном на рис. 6.1. В схеме используются следующие группы параметров:

- факторы (входные x_i);
- отклики (выходные y);
- возмущающие и управляющие воздействия (w_i).

Предполагается, что возмущающие воздействия не поддаются контролю и либо случайны, либо изменяются во времени. Каждый фактор x_i имеет область определения, которая должна быть установлена до проведения эксперимента. Комбинацию факторов можно представить как точку в многомерном (факторном) пространстве, характеризующую состояние системы.

На практике целью многофакторного эксперимента является выявление зависимости

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

описывающей поведение объекта.

На первом этапе планирования эксперимента необходимо выбрать область определения факторов x_i . Выбор этой области производится исходя из априорной информации. Значения x_i называются *уровнями управляющего параметра*.

Основные требования, предъявляемые к факторам:

- управляемость,
- однозначность,
- совместимость,
- независимость.

Управляемость. Возможность поддерживать фактор постоянным в течение всего опыта. В этом состоит особенность «активного» эксперимента.

Однозначность. Управлять фактором, являющимся функцией других факторов, весьма сложно. Но сложные факторы могут участвовать в планировании — например, соотношения между компонентами, их логарифмы и т. п. При планировании эксперимента обычно одновременно изменяется несколько факторов. Очень важно сформулировать требования, которые предъявляются к совокупности факторов.

Совместимость – важное требование, означающее, что все комбинации факторов осуществимы и безопасны. Несовместимость факторов может наблюдаться на границах областей их определения. Избавиться от нее можно сокращением областей. Если несовместимость проявляется внутри областей определения, одно из возможных решений – разбиение на подобласти и решение двух отдельных задач.

Независимость – возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов. При невыполнения этого условия планировать эксперимент невозможно. Таким образом, необходимо выполнение еще одного требования – *отсутствие корреляции между факторами*. Требование некоррелированности не означает, что между значениями факторов нет никакой связи. Достаточно, чтобы связь не была линейной.

Необходимость введения сложных факторов возникает при желании представить динамические особенности объекта в статической форме. Факторы могут быть качественные и количественные. Качественным факторам в этом случае назначают численные обозначения, чтобы перейти к количественным значениям. Здесь полагается, что все факторы являются количественными и представлены непрерывными величинами (если не оговорено другое).

Область планирования задается интервалами возможного изменения факторов $x_{i \min} < x_i < x_{i \max}$ для $i = 1, 2, \dots, k$, где k – количество факторов. В теории планирования эксперимента часто используют *нормализацию* факторов, т.е. преобразование натуральных значений факторов в безразмерные (кодированные) величины. Переход к безразмерным значениям x_i задается преобразованием

$$x_i = (\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}) / \Delta x_i,$$

где \tilde{x}_i – натуральное значение фактора; \tilde{x}_{i0} – натуральное значение основного уровня фактора, соответствующее нулю в безразмерной шкале; Δx_i – интервал варьирования.

Совокупность основных уровней всех факторов представляет собой точку в пространстве параметров, называемую центральной точкой плана или центром эксперимента. С геометрической точки зрения нормализация факторов равноценна линейному преобразованию пространства факторов, при котором производится:

- 1) перенос начала координат в точку, соответствующую значениям основных уровней факторов;
- 2) сжатие-растяжение пространства в направлении координатных осей.

План эксперимента задает совокупность данных, определяющих количество, условия и порядок реализации опытов. Опыт составляет элементарную часть эксперимента и предусматривает воспроизведение исследуемого явления в конкретных условиях с последующей регистрацией результата. В условиях случайности в одних и тех же условиях проводятся параллельные (повторные) опыты в интересах получения статистически устойчивых результатов. Каждый отдельный опыт предполагает задание конкретных значений факторам, а совокупность значений факторов во всех N точках плана эксперимента образует *матрицу плана*. Строки такой матрицы соответствуют опытам, столбцы – факторам (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Матрица планирования ПФЭ типа 2^2

№ опыта	x_1	x_2	y
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Так как стандартизованные предельные значения уровней факторов принимают только значения +1 или -1, единицу часто опускают, оставляя только знак уровня.

Вектор y называется *откликом*. В ПФЭ обычно изучается ситуация, в которой вектор отклика y состоит из одного элемента. При наличии нескольких составляющих вектора y , каждую из них можно исследовать отдельно. Зависимость отклика от факторов носит название *функции отклика*, а графическое представление функции отклика – *поверхностью отклика* (рис. 6.2).

Функция отклика рассматривается как показатель качества или эффективности объекта. Этот показатель является функцией от параметров –

факторов. На практике широкое распространение получили простые функции вида

$$M\{y'\} = b f(x),$$

где $b = (b_0, b_1, \dots, b_h)$ – вектор неизвестных параметров модели размерности $h+1$, $f(x) = (f_0(x), f_1(x), \dots, f_h(x))$ – вектор заданных базисных функций, $M\{y'\}$ – математическое ожидание функции отклика. Такое представление функции отклика соответствует линейной по параметрам модели регрессионного анализа, т.е. функция отклика есть линейная комбинация базисных функций от факторов.

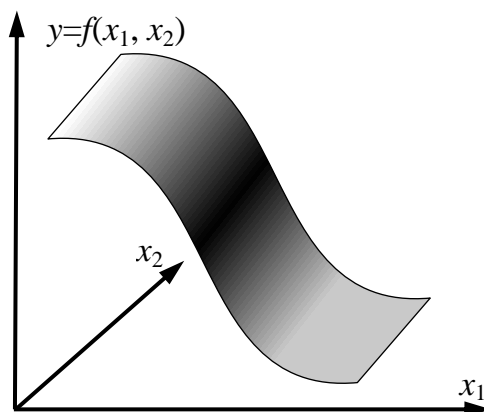


Рис. 6.2. Поверхность отклика

Как было отмечено ранее, вследствие сложности, а иногда и невозможности получения реального вида функции отклика, её представляют в виде полинома. Так, для двух факторов x_1 и x_2 :

- полином 1-й степени: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ – линейная модель;
- полином 2-й степени: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ – полная квадратичная модель.

Такая функция отклика линейна относительно неизвестных коэффициентов и будет полностью определена, если заданы степень полинома и коэффициенты. Степень полинома обычно задается исследователем априорно и уточняется в ходе исследования. Полиномы первого и второго порядка (линейные и квадратичные модели соответственно) получили наибольшее распространение на практике. Коэффициенты полинома принято называть *эффектами факторов*.

Применение теории планирования эксперимента основано на ряде допущений:

1. Функция отклика содержит в своем составе неслучайную и случайную составляющую. В процессе проведения эксперимента некоторые показатели носят случайный характер, что требует многократного повторения опытов в одних и тех же условиях для получения статистически устойчивых результатов, а получаемые оценки показателей должны обладать свойствами состоятельности, эффективности, несмещённости и достаточности. Оценки типовых показателей формируются путем усредне-

ния результатов наблюдений. Поэтому при достаточно большом количестве наблюдений можно считать, что случайная составляющая e распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, что позволяет получить несмещенную оценку математического ожидания функции отклика в конкретной точке плана. Результаты, полученные путем усреднения повторных опытов в каждой точке плана, представляют собой независимые, нормально распределенные случайные величины;

2. Факторы x_1, x_2, \dots, x_k измеряются с пренебрежимо малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении величины y (учет помех в задании факторов приводит к трудно разрешимым проблемам в оценке коэффициентов функции отклика). Ошибка в определении значения функции отклика объясняется не столько погрешностью измерений, сколько влиянием на результат работы системы неучтенных или случайных факторов, например, различиями в формируемой последовательности случайных чисел при статистическом моделировании;

3. Дисперсии среднего значения функции отклика в различных точках равны друг другу (выборочные оценки дисперсии однородны). Это означает, что при многократных повторных наблюдениях над величиной y_u при некотором наборе значений $x_{1u}, x_{2u}, \dots, x_{ku}$, получаемая оценка дисперсии среднего значения не будет отличаться от оценки дисперсии, полученной при многократных наблюдениях для любого другого набора значений независимых переменных $x_{1s}, x_{2s}, \dots, x_{ks}$.

Указанные допущения позволяют использовать для расчетов коэффициентов полинома метода наименьших квадратов (МНК), который дает эффективные и несмещенные оценки коэффициентов и обеспечивает простоту проведения самих расчетов. Применение МНК не требует обязательного соблюдения нормального распределения результатов наблюдения. Этот метод в любом случае дает решение, минимизирующее сумму квадратов отклонений результатов наблюдения от значений функции отклика. Допущение о нормальном распределении используется при проведении различного рода проверок, например, при проверке адекватности функции отклика и экспериментальных данных. Точность оценок коэффициентов функции отклика повышается с увеличением числа опытов, по которым вычисляются коэффициенты.

При планировании эксперимента стремятся получить линейную модель, однако в выбранных интервалах варьирования априори неизвестно, что линейная модель адекватно описывает поведение системы. Нелинейность связана со смешанным взаимодействием.

С ростом числа факторов возрастает число возможных взаимодействий. Например, для факторного эксперимента $N = 2^3$ кроме x_0, x_1, x_2, x_3 в матрице планирования появляются столбцы $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$ (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Развернутая МП для ПФЭ типа 2^3

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

Всего в матрице планирования оказывается восемь столбцов, следовательно, в случае учета смешанного взаимодействия необходимо определять восемь коэффициентов. Если же модель задается в виде гиперплоскости (линейная модель), то достаточно определить четыре коэффициента: x_0, x_1, x_2, x_3 . Полный факторный эксперимент оказывается избыточным. В этом случае возникает выбор:

1. Построить гиперплоскость по четырем экспериментам, а остальные четыре опыта использовать для оценки погрешности.

2. Провести эксперимент, состоящий из четырех опытов, то есть реализовать экономный план эксперимента.

Таким образом, в отличие от модели факторной поверхности, которая требует определения 2^k неизвестных коэффициентов, модель гиперплоскости, содержит $k + 1$ коэффициент и требует соответствующего числа опытов, то есть *полный факторный план* (ПФП) для модели гиперплоскости сильно избыточен.

Для построения гиперплоскости достаточно использовать некоторую часть из ПФП. Эту часть в теории планирования эксперимента называют *дробной репликой* или *дробным факторным планом* (ДФП). Если дробление ПФП производится последовательным делением числа опытов на 2, то реплику называют *регулярной*. Число p последовательного деления называют *дробностью реплики*.

Число опытов регулярного ДФП равняется 2^{k-p} . При $p = 1$ ДФП называют *полурепликой* (или $1/2$ реплика), при $p = 2$ – *четверть-реплика* и т.д. Соответствующее число опытов и параметров планирования приведены в табл. 6.3.

Для составления планов-таблиц регулярных дробных реплик часто используют так называемое *правило двоичного кода*. Оно гласит, что знаки «+» и «-» в столбцах плана должны чередоваться по правилу чередования двоичных чисел в разряде двоичного кода, то столбце x_1 через 1, в столбце x_2 – через 2, в столбце x_3 – через 4, в столбце x_k – через 2^{k-1}

Таблица 6.3. Число опытов и параметров планирования

Число факторов, k	Число коэфф. модели, $k + 1$	Число опытов	Вид плана	Число опытов плана	Избыточность
2	3	4	ПФП	4	1
3	4	8	Полуреплика	4	0
4	5	16	Полуреплика	8	3
5	6	32	Четверть-реплика	8	2
6	7	64	1/8 реплика	8	1
7	8	128	1/16 реплика	8	0
8	9	256	1/16 реплика	16	7

6.3. Критерии оптимальности и типы планов

В настоящее время используется свыше двадцати различных критериев оптимальности планов, которые подразделяются на две основные группы.

К первой группе относят критерии, связанные с ошибками оценок коэффициентов, а ко второй – с ошибкой оценки поверхности отклика.

Критерии *первой группы* представляют интерес для задач оптимизации, выделения наиболее значимых параметров на начальных этапах решения оптимизационных задач или для выявления несущественных параметров в задачах восстановления закономерности функционирования объекта. Геометрическое истолкование свойств ошибок коэффициентов связано со свойствами эллипсоида их рассеяния, определяемого математическим ожиданием и дисперсией значений ошибок. Пространственное расположение, форма и размер эллипсоида полностью зависят от плана эксперимента.

Критерию *D*-оптимальности соответствует минимальный объем эллипсоида рассеяния ошибок (минимум произведения всех дисперсий коэффициентов полинома). В соответствующем плане эффекты факторов максимально независимы друг от друга. Этот план минимизируют ожидаемую ошибку предсказания функции отклика. Критерию *A*-оптимальности соответствует план с минимальной суммарной дисперсией всех коэффициентов. Критерию *E*-оптимальности – план, в котором максимальная дисперсия коэффициентов будет минимальна.

Выбор критерия зависит от задачи исследования, так, при изучении влияния отдельных факторов на поведение объекта применяют критерий *E*-оптимальности, а при поиске оптимума функции отклика – *D*-оптимальности. Если построение *D*-оптимального плана вызывает за-

труднения, то можно перейти к A -оптимальному плану, построение которого осуществляется проще.

Критерии *второй группы* используются при решении задач описания поверхности отклика, определения ограничений на значения параметров. Основным здесь является критерий G -оптимальности, который позволяет построить план с минимальным значением наибольшей ошибки в описании функции отклика. Применение G -оптимального плана дает уверенность в том, что в области планирования нет точек с чрезмерно большой ошибкой описания функции.

Среди всех классов планов основное внимание в практической работе уделяется *ортогональным* и *ротатабельным* планам.

Ортогональным называется план, для которого выполняется условие парной ортогональности столбцов матрицы планирования, в частности, для независимых переменных, где N – количество точек плана эксперимента, k – количество независимых факторов. При ортогональном планировании коэффициенты полинома определяются независимо друг от друга – вычеркивание или добавление слагаемых в функции отклика не изменяет значения остальных коэффициентов полинома. Для ортогональных планов эллипсоид рассеяния ориентирован в пространстве так, что направления его осей совпадают с направлениями координат пространства параметров.

Использование ротатабельных планов обеспечивает для любого направления от центра эксперимента равнозначность точности оценки функции отклика (постоянство дисперсии предсказания) на равных расстояниях от центра эксперимента. Это особенно важно при решении задач поиска оптимальных значений параметров на основе градиентного метода, так как исследователь до начала экспериментов не знает направление градиента и поэтому стремится принять план, точность которого одинакова во всех направлениях. В ряде случаев при исследовании поверхности отклика требуется соблюдение постоянства значений дисперсии ошибки в некоторой области вокруг центра эксперимента (униморфность). Выполнение такого требования целесообразно в тех случаях, когда исследователь не знает точно расположение области поверхности отклика с оптимальными значениями параметров. Указанная область будет определена на основе упрощенной модели, полученной по результатам экспериментов.

По соотношению между количеством оцениваемых неизвестных параметров модели и количеством точек плана эксперимента все планы подразделяются на три класса:

- *ненасыщенные* – количество параметров меньше числа точек плана;
- *насыщенные* – обе величины одинаковы;
- *сверхнасыщенные* – количество параметров больше числа точек плана.

МНК применяют только при ненасыщенном и насыщенном планировании, и он не применим для сверхнасыщенного планирования.

Для некоторых планов важную роль играет свойство *композиционности*. Так, композиционные планы для построения полиномов второго порядка получают добавлением некоторых точек к планам формирования линейных функций. Это дает возможность в задачах исследования сначала попытаться построить линейную модель, а затем при необходимости, добавив наблюдения, перейти к моделям второго порядка, используя ранее полученные результаты и сохраняя при этом некоторое заданное свойство плана, например, его ортогональность. Между критериями оптимальности и методами построения оптимальных планов экспериментов существует жесткая связь. Построение планов производится или с использованием каталогов планов или с использованием непосредственно методов планирования экспериментов, что является непростой задачей и требует достаточно высокой квалификации исследователя в области теории планирования эксперимента

6.4. Основные термины и определения ТПЭ

Основные термины и определения приводятся в соответствии с [31].

Активный эксперимент – эксперимент, в котором уровни факторов в каждом опыте задаются исследователем.

Априорное ранжирование факторов – метод выбора наиболее важных факторов, основанный на экспертной оценке

Временный дрейф – случайное или неслучайное изменение функции отклика во времени.

Дисперсия оценки функции отклика – дисперсия оценки математического ожидания отклика в некоторой данной точке факторного пространства.

Интервал варьирования фактора – половина размаха варьирования фактора

Нормализация факторов – преобразование натуральных значений факторов в безразмерные значения.

Область оптимума – область факторного пространства в окрестности точки, в которой функция отклика достигает экстремального значения.

Область экспериментирования (область планирования) – область факторного пространства, где могут размещаться точки, отвечающие условиям проведения опытов.

Опыт – воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов.

Основной уровень фактора – натуральное значение фактора, соответствующее нулю в безразмерной шкале.

Отклик (недопустимо: *реакция на параметр*) – наблюдаемая случайная переменная, по предположению, зависящая от факторов.

Оценка функции отклика – зависимость, получаемая при подстановке в функцию отклика оценок значений ее параметров.

Параллельные опыты – рандомизированные во времени опыты, в которых уровни всех факторов сохраняются неизменными.

Пассивный эксперимент – эксперимент, при котором уровни факторов в каждом опыте регистрируются исследователем, но не задаются.

План эксперимента – совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов

Планирование эксперимента – выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям.

Поверхность отклика (недопустимо: *поверхность регрессии*) – геометрическое представление функции отклика.

Поверхность уровня функции отклика – геометрическое место точек в факторном пространстве, которому соответствует некоторое фиксированное значение функции отклика.

Последовательный эксперимент (недопустимо: *шаговый эксперимент*) – эксперимент, реализуемый в виде серий, в котором условия проведения каждой последующей серии определяются результатами предыдущих.

Размах варьирования фактора – разность между максимальным и минимальным натуральными значениями фактора в данном плане

Рандомизация плана – один из приемов планирования эксперимента, имеющий целью свести эффект некоторого неслучайного фактора к случайной ошибке.

Уровень фактора – фиксированное значение фактора относительно начала отсчета

Фактор (недопустимо: *параметр*) – переменная величина, по предположению влияющая на результаты эксперимента.

Факторное пространство – пространство, координатные оси которого соответствуют значениям факторов.

Функция отклика – зависимость математического ожидания отклика от факторов.

Эксперимент – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях

Эффект взаимодействия факторов – показатель зависимости изменения эффекта одного фактора от уровней других факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические средства диагностирования: справочник / В.В. Клюев [и др.]; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
2. Вешуткин, В.Д. Проектирование тензометрических силоизмерителей // Механика разрушения, надежность и техническая диагностика тонкостенных конструкций: Межвуз. сб. науч тр. НГТУ – Н. Новгород. – 1996 г. С. 68–78.
3. Бауманн, Э. Измерение сил электрическими методами / Э. Бауманн, – М.: Мир, – 1978. – 383 с.
4. Тихонов, А.И. Функция преобразования кольцевых упругих элементов / А. И. Тихонов, Л. И. Кулагин // Обработка информации в автоматических системах. – Рязань: Рязанский радиотехнический институт, 1977. – 286 с.
5. Тихонов, А.И. Перспективы совершенствования упругих элементов датчиков механических параметров / А. И. Тихонов, Е. А. Мокров // Измерительные элементы (датчики) информационно-измерительных систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами и систем автоматизации. – Саратов: Саратовский университет, 1979. – 244 с.
6. Маликов, Г.Ф. Расчеты упругих тензометрических элементов / Г.Ф. Маликов, А.Л. Шнейдерман, А.М. Шулемович. – М.: Машиностроение, 1964. – 192 с.
7. Вешуткин, В.Д. Стабилограф / В.Д. Вешуткин, В.И. Данилов, Г.В. Смирнов, А.П. Ефимов // Биомеханика на защите жизни и здоровья человека: Тезисы докладов 1-й Всероссийской конференции-ярмарки. Н. Новгород, 1992. – С. 47–48.
8. Вешуткин, В.Д. Комплект динамометров для функциональной биомеханической диагностики / В.Д. Вешуткин, В.И. Данилов, А.Я. Енин, Г.В. Смирнов, А.П. Ефимов // Биомеханика на защите жизни и здоровья человека: Тезисы докладов 1-й Всероссийской конференции-ярмарки. Н. Новгород, 1992. – С. 48–49.
9. Вешуткин, В.Д. Общие принципы проектирования динамометров для биомеханических исследований / В.Д. Вешуткин, Г.В. Смирнов // Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции по биомеханике. Н. Новгород, 1994. Т.2. – С. 27–28.
10. Маликов, Г.Ф. Расчеты упругих тензометрических элементов / Г.Ф. Маликов, А.Л. Шнейдерман, А.М. Шулемович. – М.: Машиностроение, 1964. – 192 с.
11. Вешуткин, В.Д. Стабилограф / В.Д. Вешуткин, В.И. Данилов, Г.В. Смирнов, А.П. Ефимов // Медицинская техника. 1993 – №1. – С. 40-41.

12. Касаткин, Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. / Б.С. Касаткин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1981. – 584 с.
13. Полупроводниковые измерительные преобразователи деформации, температуры и магнитного поля для применения в условиях радиационного облучения, широком диапазоне температур и магнитных полей / Беляков В.А. [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Электрофизическая аппаратура, 2005, №3(29). С.46–54.
14. Клокова, Н.П. Тензорезисторы / Н.П. Клокова. – М., 1990.
15. Мехеда, В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2011. – 56 с.
16. Механические испытания материалов: учеб. пособие / А.Е. Жуков [и др.] Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 86 с.
17. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие / И.А. Реброва. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.
18. Кузнецова, Е.В. Математическое планирование эксперимента: учеб.-метод. пособие. Е.В. Кузнецова. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с.
19. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М: Наука, 1976. – 279 с.
20. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1969. – 155 с.
21. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие / под ред. Б.С. Касаткина. – Киев: «Наукова думка», 1981. – 589 с.
22. Кузнецова, Е.В. Экспериментальная механика: учебно-методическое пособие / Е.В. Кузнецова. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 43 с.
23. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман [и др.]. – М.: Мир, 1977 – 552 с.
24. Бойко, Н.Г. Теория и методы инженерного эксперимента: курс лекций / Н.Г. Бойко, Т.А. Устименко. – Донецк, ДонНТУ, 2009. – 158 с.
25. Рогов, В.А. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие / В.А. Рогов, Г.Г. Позняк. – М.: Академия, 2005. – 283 с.
26. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов: учебник / В. Г. Блохин [и др.]; под ред. О.П. Глудких. – М.: Радио и связь, 1997.
27. Львович, Я.Е. Теоретические основы конструирования, технология и надежности РЭА: учеб. пособие / Я.Е. Львович, В.Н. Фропов. – М.: Радио и связь, 1986. – 192 с.

28. Методология планирования эксперимента: методические указания к лабораторным работам / сост. Т. П. Абомелик. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 38 с.
29. Фокичева, Е.А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований: учеб. пособие / Е.А. Фокичева, М.И. Алексеев. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 72 с.
30. ГОСТ 24026-80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения». – М., 1980.
31. Мэклин, Э.Д. Терморезисторы / Э.Д. Мэклин. – М: Радио и связь. – 1983.
32. Шашков, А.Г. Терморезисторы и их применение / А.Г. Шашков. – М.: Энергия, 1967. – 320 с.
33. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы: учебник / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – М.: Высшая школа, 1987. – 479 с.
34. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
35. Тумайкин, Д. Прецизионный термометр для промышленного применения на основе термочувствительных кварцевых резонаторов / Д. Тумайкин, М. Тумайкин // Компоненты и технологии. – 2008. – №1. – С. 72–73.
36. Мухин, В.Л. Дистанционный кварцевый термометр / В.Л. Мухин // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – №1. – С.242.
37. Мухин, В.Л. Пьезокварцевый измеритель разности температур / В.Л. Мухин, А.Я. Муляр, Р.Н. Чжу // Приборы и техника эксперимента. 1990. – №4. – С.246.
38. Мухин, В.Л. Кварцевый датчик температуры / В.Л. Мухин // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – Т. 34. – №2. – С. 241.
39. Мухин, В.Л. Кварцевый датчик температуры для скважин / В.Л. Мухин // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – Т. 34. – №2. – С. 241.
40. Классификация весоизмерительного оборудования [Электронный ресурс] / Знайтовар.Ру – торговля, бизнес, товароведение, экспертиза. URL: <https://znaytovar.ru/new2876.html>
41. Вешуткин, В.Д. Экспериментальная механика: учеб. пособие. Часть 1 / В.Д. Вешуткин, А.Е. Жуков, – Нижний Новгород, 2016. – 83 с.

**Вешуткин Владимир Дмитриевич
Жуков Александр Евгеньевич**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Часть 2

Редактор Н. Н. Максимова
Технический редактор Т. П. Новикова
Компьютерный набор и верстка авторов

Подписано в печать 25.12.2018. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,25. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.